

UNIVERSIDADE DE LISBOA

FACULDADE DE CIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**Desenvolvimento e Validação do Sistema de Iluminação de  
Luz Ultravioleta (UV e VUV) da Infraestrutura de Simulação de  
Deterioração de Coberturas de Satélites**

Diana Galocha Pascoal

**Mestrado Integrado em Engenharia Física**

Dissertação orientada por:  
Professor Doutor António Amorim  
Doutor Paulo Gordo

2016

# Dedicatória

Aos meus pais, que foram a minha retaguarda e tantas vezes estiveram na linha da frente dos meus objetivos, seguidores incansáveis deste meu trajeto formativo, e generosos a ponto de me fazerem esquecer das dificuldades por que talvez pudesse passar, caso não estivessem presentes e não fossem aqueles em quem deposito e sempre depositarei a maior e mais sincera confiança.

Às minhas irmãs que, em nome dessa firme e inquebrável amizade, também fizeram de mim aquela que eu sou e me ajudaram a ser mais digna, confiante e feliz.

# Agradecimentos

Não posso deixar de agradecer à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, particularmente ao Departamento de Física, e a todos aqueles que a constituem e lhe conferem a dignidade que a instituição merece e granjeia, pela eficácia, excelente (in)formação prestada, elevado nível de exigência e padrões de qualidade que em mim incutiram e de que este trabalho é a interpretação mais modesta.

Agradeço, igualmente, aos meus Formadores António Amorim e Paulo Gordo, espelho supremo do exercício crítico essencial à minha prestação académica e científica, capazes de suscitar em mim uma cultura de autoconsciência, de trabalho e de rigor. Não esqueço, de modo algum, a forma amistosa como me acolheram, o efetivo lugar do necessário sacrifício de que me dotaram (porque não há mérito sem sacrifício) e a marca de humildade que também na minha pessoa souberam imprimir.

Aos meus Amigos, companheiros essenciais nesta jornada académica, que sempre me souberam transferir essa dose de solidariedade e conforto, necessários à minha solidez enquanto aluna, investigadora e pessoa, deixo ainda um agradecimento muito especial.

Estou, para terminar, profundamente agradecida a todos aqueles que, de uma forma geral, aqui invoco e que, de algum modo mais ou menos explícito, ainda que sem o saberem, terão sido decisivos para que este trabalho tenha tido o valor que possa eventualmente merecer.

# Resumo

A qualificação de materiais para uso no espaço apresenta-se uma tarefa desafiadora. Os ensaios de degradação do material detêm maior fiabilidade, quando ele pode ser exposto ao ambiente a que será sujeito nas condições do espaço.

O trabalho descrito neste documento constitui-se como parte de um projeto intitulado “*Space Debris from Spacecraft Degradation Products*” da ESA (*European Space Agency*). O objetivo principal deste projeto é o da avaliação das características e da quantidade de detritos de objetos espaciais resultantes da degradação da superfície de satélites e naves espaciais. Foi objeto de trabalho DA TESE desenvolver e aplicar-se um sistema que visa testar materiais face a exposição VUV (*Vacuum UV*). Este sistema simula o ambiente espacial VUV de forma acelerada, ante o qual uma nave está sujeita na *LOW Earth Orbit* (LEO).

Encontram-se descritos, neste documento, testes de laboratório, em que foram utilizados um detetor e uma lâmpada de VUV. Nestes testes foi medida a corrente gerada no detetor, devido à radiação da lâmpada incidente, de modo a ser calculado o número de sóis de VUV. Assim, tornou-se possível dimensionar um sistema em vácuo que irradia uniformemente um conjunto de amostras de materiais espaciais, podendo prever-se qual seria o tempo necessário a que as amostras terão de ser sujeitas à radiação, de maneira a ser simulado o valor temporal de horas no espaço exigidas pela ESA.

O estudo do efeito da radiação VUV em materiais espaciais, de noções radiométricas e de detetores e fontes de VUV constituem uma marca essencial neste trabalho, uma vez que se crê ter sido possível perceber o modo como o sistema de simulação deveria ser idealizado e desenvolvido.

# Abstract

The qualification of materials for space using purposes is a challenging process.

Material damage control tests are more reliable when they previously face the same type of environment they will be exposed to in space conditions.

The present essay is part of a project entitled “Space Debris Spacecraft from Degradation Products” from the European Space Agency (ESA). Its main purpose is evaluating the characteristics and the quantity of debris resulting from surface of satellites and spacecraft materials degradation.

This study aimed to develop and apply a testing system for materials exposed to Vacuum UV (VUV). This system simulates space environment on an accelerated mode, the very same endured by a spaceship in Low Earth Orbit (LEO). This work describes lab tests in which a VUV source and a detector were used. In these tests, it was measured the current generated by the incident of the VUV source radiation in the detector so that the VUV number of suns is calculated.

Thus, we are able to create a vacuum system that radiates a set of materials’ samples, being also possible to predict the period of time to which the samples must be endured to radiation so that the time value in number of hours in space required by ESA may be simulated.

The study of the VUV radiation in space materials, of radiometric concepts, of detectors and VUV sources is as essential feature of this research work, since it is now possible to understand how the simulation system should be designed and developed.

# Índice

Dedicatória .....	i
Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iii
Abstract .....	iv
Índice.....	v
Lista de Figuras .....	viii
Lista de Tabelas.....	xi
1. Introdução.....	1
2. Ambiente Espacial para Satélites em orbitas “LEO” .....	3
2.1. Oxigénio Atómico .....	4
2.2. Efeitos de contaminação.....	5
2.3. Radiação Eletromagnética.....	6
2.3.1. Radiação Eletromagnética Solar.....	6
2.4. Efeitos térmicos e dos ciclos térmicos.....	7
2.5. Efeitos de micrometeoritos e detritos orbitais .....	7
3. Radiação UV/VUV.....	9
3.1. Interação da radiação ultravioleta com a matéria .....	9
4. Introdução à Radiometria .....	13
4.1. Propagação de Radiação Ótica .....	13
4.1.1. Raios e Ângulos.....	13
4.2. Quantidades radiométricas fundamentais .....	16
4.2.1. Radiância.....	16
4.2.2. Emitância.....	16
4.2.3. Irradiância.....	17
4.2.4. Intensidade Radiante .....	18
4.3. Grandezas Radiométricas Espectrais .....	18
4.4. Aproximações Radiométricas.....	19
4.4.1. Lei do Inverso do Quadrado .....	19
4.4.2. Lei do Cosseno <sup>3</sup> .....	19
5. Detetor de Radiação .....	21

5.1.1.	Detetores Fotoelétricos .....	23
5.1.1.1.	Detetores Foto-Emissivos: Princípios Básicos .....	26
5.1.1.1.1.	Corrente Escura .....	27
5.1.1.1.2.	Tipos de Detetores Foto-Emissivos .....	27
6.	Fontes de UV/VUV .....	30
7.	Sistema de Simulação Espacial do CENTRA-SIM – Descrição Geral .....	32
7.1.	Subsistema de Ciclos Térmicos .....	32
7.2.	Sistema de Simulação de VUV Orbital .....	34
7.2.1.	Lâmpada de VUV: Especificações Técnicas .....	35
7.2.2.	Fototubo: Especificações Técnicas .....	37
7.2.2.1.	Desenho e Construção da Estrutura de Apoio ao Detetor .....	39
7.3.	projeto Final do Sistema de Simulação Espacial do CENTRA-SIM .....	41
8.	Resultados do Programa de Irradiação UV no Simulador CENTRA-SIM .....	43
8.1.	Cálculos Radiométricos – Estimativa da Corrente Gerada .....	43
8.2.	Número de Sóis de VUV .....	45
8.3.	Circuitos de Operação do Detetor .....	45
8.3.1.	Circuito com Picoamperímetro .....	46
8.3.2.	Circuito de Aquisição .....	47
8.4.	Sistema de Monitorização .....	50
8.5.	Testes com Circuito do Picoamperímetro .....	51
8.6.	Testes com Circuito de Aquisição .....	52
8.7.	Reta de Calibração do Circuito de Aquisição .....	53
8.8.	Primeira série de Valores de Corrente no Sistema de Simulação .....	54
8.9.	Interrupção da primeira série de testes no sistema de simulação .....	54
8.10.	Fixação e Remoção de Radicais Orgânicos .....	56
9.	Conclusão dos Testes no Sistema de Simulação .....	58
9.1.	Número de sóis de VUV e Horas equivalentes de sol (EHS) .....	58
9.2.	Problemas no alinhamento do Sistema .....	61
10.	Conclusões .....	63
11.	Desenvolvimentos Futuros .....	64
	Referências .....	65
12.	Anexo A .....	67
13.	Anexo B .....	68





# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Variação do ambiente espacial com a altitude.....	4
Figura 2.2 – Espectro da irradiância do Sol medida acima do topo da atmosfera (à esquerda); Curva da irradiância solar em função da energia dos fótons (à direita). ....	7
Figura 2.3 -A órbita LEO é a mais concentrada em detritos orbitais. [23] .....	8
Figura 2.4 - Estrago provocado pelo impacto de detritos orbitais num painel solar do telescópio Hubble. [24] .....	8
Figura 3.1 - MLI (Multilayer Insulation) de FEP utilizado no telescópio espacial Hubble (HST) que foi lançado na órbita LEO em Abril de 1990. [22] .....	11
Figura 3.2 – Comprimentos de onda necessários para quebrar várias ligações de polímeros.....	11
Figura 4.1 – (a) Frente de onda plana; (b) Frente de onda curva. As setas indicam a direção de propagação da radiação.....	13
Figura 4.2 - Ângulo sólido e relações. ....	14
Figura 4.3 – Ângulo plano e relações.....	14
Figura 4.4 – Cone circular. Semiângulo $\Theta_{1/2}$ .....	15
Figura 4.5 – Ângulo sólido projetado e sua relação com o ângulo sólido.....	15
Figura 4.6 – Radiância a partir de um elemento de área $dA$ , com inclinação $\theta$ segundo a normal $n$ da superfície. ....	16
Figura 4.7 - Emitância de uma fonte. ....	17
Figura 4.8 - Irradiância sobre uma superfície.....	17
Figura 4.9 – A grandeza radiométrica representa a área sob a curva a vermelho. ....	18
Figura 4.10 – Ilustração da lei do inverso do quadrado. ....	19
Figura 4.11 – Área com uma inclinação $\Theta$ em relação ao eixo ótico.....	19
Figura 4.12 – Lei do cosseno <sup>3</sup> . ....	20
Figura 5.1 - Semicondutor intrínseco, onde um eletrão da banda de valência ( $E_v$ ) absorve a energia de um fóton incidente ( $E_p$ ) e é excitado para a banda de condução ( $E_c$ ). ....	24
Figura 5.2 – Estrutura de bandas de um semicondutor extrínseco do tipo N. ....	25
Figura 5.3 - Estrutura de bandas de um semicondutor extrínseco do tipo P. ....	25
Figura 5.4 – Fotoemissão em semicondutores. ....	27
Figura 5.5 - Equação de Richardson que expressa a corrente escura em função da temperatura. ....	27
Figura 7.1 - Design final do subsistema de ciclos térmicos em vácuo.....	33
Figura 7.2 – Sistema sem a base de alumínio. Pode-se observar a interface térmica de cobre dos pistões. ....	33
Figura 7.3 - Arquitetura do sistema VUV. ....	34
Figura 7.4 – Porta-amostras. A amarelo encontra-se assinalado o orifício onde, imediatamente atrás, foi colocado o detetor. ....	34
Figura 7.5 – Gráfico da Irradiância relativa das lâmpadas L11798 e L10366 em função do comprimento de onda. Este foi fornecido pelo fabricante e não se encontra em nenhuma datasheet das referências. ....	35
Figura 7.6 –Espectro da Irradiância da lâmpada L10336 a 50 cm. Este foi fornecido pelo fabricante e não se encontra em nenhuma datasheet das referências.....	36
Figura 7.7 – Esquema para calcular a distância da fonte ao porta-amostras de forma a este ficar totalmente iluminado.....	36

Figura 7.8 - Porta-amostras final. Assinalado a vermelho está o orifício de passagem de luz para o detetor que se encontra imediatamente atrás deste.....	37
Figura 7.9 – Especificações técnicas do detetor: gráfico da Sensibilidade Radiante em função do comprimento de onda. ....	37
Figura 7.10 – Especificações técnicas do detetor: dimensões do detetor e fotografia do detetor. [14]..	38
Figura 7.11 -Socket do detetor. Este desenho técnico foi fornecido pelo fabricante e não se encontra em nenhuma datasheet das referências.....	38
Figura 7.12 - Estrutura para o detetor vista de cima. (1) Peça em epóxi; (2) e (3) Orifícios das peças de alumínio onde entram parafusos; (4) Orifícios que servem de encaixe para o socket do detetor. ....	39
Figura 7.13 - Estrutura para o detetor. (1) Peça em epóxi que se adapta a uma peça de epóxi do suporte interior de epóxi (sistema de ciclos térmicos) e que se encontra atrás do porta-amostras; (2) Varões roscados; (3) Peça em epóxi; (4) Peças em Alumínio. ....	39
Figura 7.14 - Caixa de alumínio que contem o circuito de aquisição em stycast fixa na flange da câmara de vácuo.....	40
Figura 7.15 - Sensor de Temperatura LM335 fixo com stycast numa das peças de alumínio da estrutura para o detetor. ....	40
Figura 7.16 - Temperatura das peças de alumínio em função do tempo. ....	40
Figura 7.17 - Estrutura montada no sistema final e o detetor de VUV colocado no socket.....	41
Figura 7.18 - (1)Estrutura para o detetor montada no sistema total; (2) Socket do detetor de VUV. ....	41
Figura 7.19 - Circuito do sensor de temperatura LM335. Onde R1 é 1 k $\Omega$ e V+ 5V. ....	41
Figura 7.20 - Execução das peças da estrutura na CNC.....	41
Figura 7.21 - Interface entre a câmara de vácuo e a lâmpada desenhada em SolidWorks.....	42
Figura 7.22 - Interface entre a câmara de vácuo e a lâmpada. Pode ainda observar-se a bomba de vácuo, responsável por fazer vácuo nesta zona de ligação no processo de retirar/colocar a lâmpada.....	42
Figura 7.23 - Desenho final do Sistema. ....	42
Figura 8.1 –Esquema da posição do detetor em relação à fonte. (Não está à escala) .....	44
Figura 8.2 - Circuito com picoamperímetro.....	46
Figura 8.3 - Montagem do Circuito com Picoamperímetro. ....	46
Figura 8.4 - Circuito de Aquisição. ....	47
Figura 8.5 - Circuito com Stycast.(1)Alimentação do retificador de tensão; (2)Fio liga ao ânodo do detetor; (3)Tensão de Saída Vout; (4)Ground; (5)Fio liga ao cátodo do detetor.....	48
Figura 8.6 – Circuito corrigido de Aquisição.....	49
Figura 8.7 - Sistema de Calibração. (1)Detetor de fugas/Bomba de Vácuo; (2)Lâmpada VUV; (3)bellows; (4) Ficha para vácuo; (5)Suporte dos tubos.....	50
Figura 8.8 - Sistema de Calibração. Aproximação da zona de ligação entre a lâmpada e os tubos. (1)Lâmpada; (2)Peça de adaptação da lâmpada ao sistema; (3)Cubo; (4) Zona que liga o sistema ao detetor de fugas/bomba de vácuo. ....	50
Figura 8.9 – Gráfico da corrente em função do inverso do quadrado da distância entre a lâmpada e o detetor.....	51
Figura 8.10 - Sistema de Monitorização com Circuito de Aquisição.....	52
Figura 8.11 - Sistema de Monitorização com o circuito do picoamperímetro. ....	52
Figura 8.12 – Gráfico da relação entre o número de sóis corrigidos e a tensão de saída do circuito de aquisição.....	53

Figura 8.13 - Gráficos dos valores de corrente do início do tempo de vida da lâmpada (a azul) e de passadas 352 horas de operação da lâmpada (a cor de laranja).....	55
Figura 9.1 - Gráfico da corrente em função do inverso do quadrado da distância. Estes valores foram obtidos depois de a lâmpada operar durante 2142 horas. ....	58
Figura 9.2 - Valores iniciais de corrente (início de vida da lâmpada – a cor de laranja) e valores finais de corrente (passadas 2142 horas de operação da lâmpada – a azul) em função do inverso do quadrado da distância entre a lâmpada e o detetor.....	59
Figura 9.3 - Número de Sóis no decorrer dos testes no sistema de simulação espacial. ....	60
Figura 9.4 - Porta-amostras e área iluminada pela lâmpada de VUV (assinalada com a linha azul). ....	61
Figura 9.5 – Sistema de mediação da uniformidade da irradiância no porta-amostras. (1) base de alumínio; (2) varão roscado; (3) peças em teflon; (4) peça em epóxi; (5) rolamentos de teflon; (6) peça em alumínio; (7) peças em alumínio que contêm os rolamentos. ....	62
Figura 11.1 – Reta de calibração e curvas de tendência ajustadas aos extremos das barras de erro. ....	69
Figura 11.2 – Variação da incerteza expandida em função da distância. ....	70

# Lista de Tabelas

Tabela 2-1 – Impacto relativo dos efeitos do ambiente espacial em materiais na órbita LEO. A classificação varia desde um impacto de 0 (efeitos podem ser ignorados) até um impacto de 10 (os efeitos impossibilitam a missão de continuar). A lista é a seguinte: 0 – Efeitos produzidos podem ser ignorados; 1 – Efeitos produzidos podem causar constrangimentos; 2 - Efeitos produzidos causam constrangimentos 3 – Efeitos produzidos podem requerer alterações no design; 4 - Efeitos produzidos requerem alterações no design; 5 – Efeitos produzidos podem reduzir a eficácia da missão; 6 – Efeitos produzidos reduzem a eficácia da missão; 7 – Efeitos produzidos podem encurtar a missão; 8 – Efeitos produzidos encurtam a missão; 9 – Efeitos produzidos podem impossibilitar a continuação da missão; 10 – Efeitos produzidos impossibilitam a continuação da missão. [1] ..... 3

Tabela 4-1 – Exemplos de áreas projetadas. Na tabela, l é a largura do retângulo e w a sua altura, r o raio do círculo ou da esfera e d o diâmetro do círculo ou da esfera. .... 14

Tabela 5-1 – Detetores térmicos e fotoelétricos. .... 21

Tabela 5-2 – Materiais utilizados em cátodos de detetores foto-emissivos. .... 28

Tabela 8-1 – Valores de irradiância, número de sóis e dias equivalentes calculados para os valores de corrente obtidos com o circuito do picoamperímetro. Os Dias equivalentes correspondem ao número de dias em laboratório necessários para simular as 5000 horas no espaço. .... 51

Tabela 8-2 - Valores de irradiância, número de sóis e dias equivalentes calculados para os valores de corrente obtidos com o circuito de aquisição. Os Dias equivalentes correspondem ao número de dias em laboratório necessários para simular as 5000 horas no espaço. .... 52

Tabela 8-3 – Diferenças percentuais entre os valores de corrente obtidos para o início de vida da lâmpada e para passadas 352 horas de operação. .... 55

# 1. Introdução

Pensar no espaço leva comumente a tomar-se em consideração uma região em vácuo, entre o topo da atmosfera da Terra e outros planetas e estrelas, contendo muito pouca matéria. Contudo, o espaço que se estende para além da atmosfera da Terra encerra vários agentes que tornam a projeção de satélites e naves espaciais um desafio enorme e uma experiência invariavelmente arriscada. O ambiente espacial experimentado por veículos espaciais degrada os materiais usados nas suas superfícies. É neste contexto que surge o projeto exposto no presente documento, bem como o trabalho e reflexão que dele resultam.

O projeto foi impulsionado pela ESA e designa-se “*Space Debris from Spacecraft Degradation Products*”, tendo como principal importância a de estudar o efeito de agentes relativos ao ambiente espacial da órbita LEO, em superfícies de satélites e naves espaciais. O propósito que se reclama é o de avaliar a quantidade de detritos formados devido à degradação experimentada pelos materiais espaciais.

O trabalho desenvolvido por mim, e que representa uma parte do projecto mais abrangente, consiste no desenvolvimento de um sistema de simulação espacial de VUV. No intuito de tirar o melhor partido deste sistema, partiu-se de um estudo que inclui a obtenção de noções precisas sobre o efeito dos principais agentes do ambiente espacial na órbita LEO e, num plano mais detalhado, o modo como a radiação ultravioleta interage com a matéria, além de noções de radiometria. Procedeu-se igualmente a um estudo prévio dos tipos de detetores e das fontes de VUV que melhor se adequam ao caso em questão.

Dentre o espectro ultravioleta e agentes espaciais da órbita LEO, a radiação VUV surge como a que mais degradação e contaminação causa em materiais espaciais e os fenómenos que desperta aquando da sua interação com a matéria são ainda objeto de estudo, tendo em atenção a sua complexidade. Possui essa radiação, além do mais, a energia suficiente para quebrar e afetar ligações químicas numa série de materiais. Acresce que são os polímeros os materiais mais insistentemente afetados por esta radiação.

Para além da radiação ultravioleta, do oxigénio atómico, dos efeitos térmicos e dos ciclos térmicos, o efeito da contaminação e os micrometeoritos e detritos espaciais surgem, também, como outros responsáveis pela degradação das superfícies exteriores de veículos espaciais.

Todo o trabalho desenvolvido foi realizado no contexto do grupo CENTRA-SIM. O sistema de simulação espacial, que opera no espaço de instalações da FCUL, é, diga-se de passagem, constituído por uma câmara de vácuo que inclui dois subsistemas. Um deles consubstancia-se no subsistema de simulação de VUV, já mencionado e para o qual remete todo o estudo exposto neste documento, e o outro consiste no subsistema de ciclos térmicos. O sistema de simulação espacial de VUV, para abreviar, é constituído por uma lâmpada de VUV, um detetor foto-emissivo e um porta-amostras que contém uma série de amostras, irradiadas uniformemente com radiação VUV. Antes de se proceder ao desenvolvimento deste sistema, foi necessário desenvolver um outro, capaz de permitir estudar o comportamento da lâmpada e do detetor.

O detetor foto-emissivo consiste num fototubo cuja função é a de gerar corrente consoante a radiação que o irradia e seja emitida pela lâmpada. A partir dos valores de corrente obtidos, torna-se possível estimar, seguindo uma série de procedimentos matemáticos, o tempo a ser cumprido em laboratório, para poder simular-se um determinado número de horas no espaço.

A lâmpada, de deutério, inclui-se no tipo de lâmpadas mais utilizado em sistemas que envolvem espectroscopia de radiação ultravioleta. Esta também facilita os testes acelerados em laboratório, o que se torna revelante nesta área de estudo de efeitos gerados por fatores relativos à ação produzida pelo ambiente espacial em materiais. Com o resultado dos testes de laboratório executados e beneficiando do auxílio de

várias referências, concluiu-se que, passadas algumas horas de operação, a janela deste tipo de lâmpadas acusa contaminação, formando-se nela uma camada de material depositado que afeta a potência da lâmpada.

Com este fenómeno e, por acréscimo, em atenção ao facto de a janela do detetor ser passível de sofrer, de modo idêntico, contaminação efetiva, em razão de causas posteriormente mencionadas, novas implicações surgiram no plano da monitorização relativa à irradiância no porta-amostras do sistema, como se passará prontamente a esclarecer.

## 2. Ambiente Espacial para Satélites em orbitas “LEO”

Qualquer material no exterior de uma nave espacial se degrada, em função da sua exposição ao ambiente inóspito do espaço. Constituem-se principais agentes responsáveis por essa degradação a radiação de fótons (incluindo todo o espectro), a radiação de partículas carregadas, temperaturas extremas aplicadas em ciclos térmicos, o impacto de micro-meteoroides e detritos, contaminação e o oxigénio atômico. O impacto relativo de cada agente depende do tipo de missão a ser realizada (casos de satélites de comunicação ou observação da Terra), da duração da missão, dos ciclos solares e, mais importante, da órbita onde a nave espacial será colocada. A Figura 2.1 que adiante se apresenta evidencia as variações do ambiente espacial em função da altitude da órbita. A órbita LEO (*Low Earth Orbit*) estende-se até aos 1000 km. Já a órbita MEO (*Mid Earth Orbit*) situa-se entre os 1000 km e os 35000 km. E a órbita GEO (*Geosynchronous Orbit*) estende-se acima dos 35000 km.

Tomando por princípio que a principal ênfase deste projeto se dedica ao estudo do efeito do ambiente espacial na órbita LEO, destacar-se-á somente os efeitos do mesmo em naves ou satélites situados a essa altitude.

Os efeitos do ambiente espacial negam, encurtam ou reduzem a eficácia da missão, bem como as alterações das naves espaciais, podendo elas ser permanentes ou temporárias. Na tabela seguinte, pode verificar-se qual o impacto relativo de cada agente do ambiente espacial na nave situada na órbita LEO.

*Tabela 2-1 – Impacto relativo dos efeitos do ambiente espacial em materiais na órbita LEO. A classificação varia desde um impacto de 0 (efeitos podem ser ignorados) até um impacto de 10 (os efeitos impossibilitam a missão de continuar). A lista é a seguinte: 0 – Efeitos produzidos podem ser ignorados; 1 – Efeitos produzidos podem causar constrangimentos; 2 - Efeitos produzidos causam constrangimentos 3 – Efeitos produzidos podem requerer alterações no design; 4 - Efeitos produzidos requerem alterações no design; 5 – Efeitos produzidos podem reduzir a eficácia da missão; 6 – Efeitos produzidos reduzem a eficácia da missão; 7 – Efeitos produzidos podem encurtar a missão; 8 – Efeitos produzidos encurtam a missão; 9 – Efeitos produzidos podem impossibilitar a continuação da missão; 10 – Efeitos produzidos impossibilitam a continuação da missão. [1]*

<b>Agente do Ambiente Espacial</b>	<b>LEO Low Incl. (Baixa inclinação)</b>	<b>LEO High Incl. (Elevada inclinação)</b>
<b>Luz solar direta</b>	4	4
<b>Campo Gravítico</b>	3	3
<b>Campo Magnético</b>	3	3
<b>Cinturão de Van Allen<sup>1</sup></b>	0-5	2-5
<b>Partículas Resultantes de Explosões Solares</b>	0	4
<b>Raios Cósmicos Galácticos</b>	0	4
<b>Detritos</b>	7	7
<b>Micro-meteoroides</b>	3	3
<b>Ionosfera</b>	3	3
<b>Plasma Quente</b>	0	3
<b>Gases Neutros</b>	9-7	9-7

<sup>1</sup> Corresponde a uma região onde ocorrem inúmeros fenómenos atmosféricos devido a concentrações de partículas no campo magnético terrestre e que foram descobertas por James Van Allen em 1958.

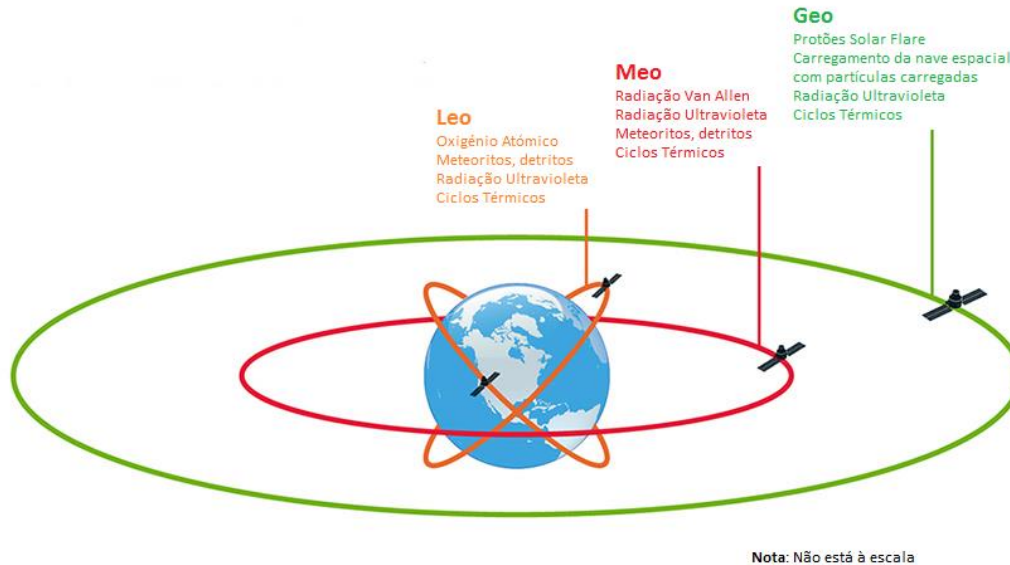


Figura 2.1 - Variação do ambiente espacial com a altitude.

As propriedades fundamentais das superfícies exteriores de naves espaciais são a integridade estrutural e propriedades termo-ópticas. Surgem os problemas, de forma geral, assim que os materiais das superfícies se tornam demasiado finos ou frágeis para suportar uma carga necessária ou quando os revestimentos de isolamento térmico sofrem dano. As temperaturas de operação de sistemas da nave espacial, dado encontrarem-se em alto vácuo, dependem apenas das superfícies exteriores, principalmente no que aos valores de absorvidade solar<sup>2</sup> e emitância térmica<sup>3</sup> necessários diz respeito. A degradação destas propriedades termo-ópticas pode causar uma alteração indesejada na temperatura do veículo espacial ou nos seus componentes.

Os principais agentes responsáveis pela degradação de satélites na órbita LEO são os que agora se referem:

- Oxigénio Atómico (ver secção 2.1);
- Efeitos da contaminação (ver secção 2.2);
- Radiação eletromagnética, em especial a radiação VUV (ver secção 2.3);
- Efeitos térmicos e dos ciclos térmicos (ver secção 2.4);
- Micrometeoritos e detritos espaciais (ver secção 2.5).

De seguida, procederei à menção dos efeitos destes agentes, na circunstância da sua ação de degradação, em superfícies de satélites ou naves espaciais da órbita LEO.

## 2.1. OXIGÉNIO ATÓMICO

O oxigénio atómico forma-se na órbita LEO por foto-dissociação do oxigénio diatómico. A reação deste em função dos materiais espaciais tem sido estudada, por se constituir um relevante problema. O oxigénio

<sup>2</sup> Absorvidade solar é a fração de energia solar incidente absorvida pela superfície.

<sup>3</sup> Emitância térmica é a razão entre a energia emitida a partir de uma superfície e a que deveria ser emitida a partir de uma superfície emissora perfeita (corpo negro).



atômico reage com polímeros, carbono e muitos metais, para formar ligações com átomos na superfície que é exposta.

Com a exposição contínua a oxigénio atômico, os materiais sofrem um processo de oxidação e formam-se produtos de oxidação voláteis acompanhados pela erosão gradual de materiais de hidrocarbonetos.

O oxigénio atômico consegue, além do mais, oxidar as superfícies de metais, gerando óxidos metálicos não-voláteis. Contudo, para a maioria dos metais, os óxidos tendem a formar uma camada na superfície do metal que o protege da oxidação posterior. A prata torna-se uma exceção, pois os seus óxidos não se fixam, consentindo uma oxidação contínua. É assim que as células solares de prata não são utilizadas na órbita LEO [2].

A erosão provocada pelo oxigénio atômico em polímeros na órbita LEO tem representado um grande desafio na performance e durabilidade das naves espaciais. Foram, atualmente, tomadas três abordagens, de forma a reduzir ou eliminar esta erosão. A primeira consiste na modificação da superfície dos polímeros, de modo a que estes se tornem mais resistentes aos efeitos do oxigénio atômico, a segunda trata-se da aplicação de um revestimento fino feito de materiais resistentes ao oxigénio atômico; e a terceira abordagem inclui o uso de polímeros alternativos contendo átomos de metais que desenvolvem um revestimento protetor. A segunda abordagem é a mais utilizada e os revestimentos são de SiO<sub>2</sub>, Ge, Si, Al e Au com espessura a partir de algumas dezenas a mais de 100 nm. Estes revestimentos são aplicados através de deposição por pulverização<sup>4</sup> catódica e por evaporação.

## 2.2. EFEITOS DE CONTAMINAÇÃO

Os materiais estruturais de qualquer satélite contêm polímeros que, sob as condições ambientais da órbita LEO, libertam contaminantes para o satélite, podendo, desta forma, afetar a missão.

A contaminação de satélites e naves espaciais pode ser definida como matéria particulada ou molecular e os contaminantes são passíveis de se depositar nas suas superfícies ou permanecer na sua vizinhança. Os contaminantes orgânicos podem ser formados através de uma série de processos. As fontes de contaminação podem ser resíduos da propulsão<sup>5</sup>, a desgaseificação de materiais espaciais, fluidos libertados pela própria nave, micrometeoritos e detritos orbitais, partículas geradas durante operações mecânicas do veículo espacial e produtos resultantes do *outgassing*<sup>6</sup>.

As interações do ambiente espacial com materiais podem, igualmente, produzir contaminantes, de que são exemplo produtos voláteis das reações com o oxigénio atômico e produtos resultantes de reações de cisão em polímeros induzidas por radiação ultravioleta. Estes produtos voláteis tendem a serem absorvidos em superfícies frias, contaminando-as. Os efeitos do ambiente espacial, como os produzidos pelo oxigénio atômico, pelos raios ultravioletas e pela radiação, podem ainda modificar as espécies contaminantes.

---

<sup>4</sup> É um método de deposição física de vapor em que são depositados filmes finos por pulverização catódica (*ou sputtering*). A pulverização catódica ocorre sempre que a superfície de um material sólido é bombardeada por átomos ou iões com energias de alguns eV ou keV e ocorrerá erosão da mesma, através da remoção de alguns átomos superficiais.

<sup>5</sup> A propulsão de um veículo espacial ocorre, quando na válvula de ignição, as substâncias hipergólicas são misturadas e se inicia o processo de combustão espontânea que impulsiona a nave.

<sup>6</sup> É a libertação de gás que foi dissolvido, preso, congelado ou absorvido num determinado material. Este fenómeno pode incluir sublimação e evaporação. O facto de ocorrer *outgassing* representa um grande desafio para criar e manter ambientes de elevado vácuo. Existem várias listas de materiais que possuem baixo *outgassing* e que são usados para aplicações no espaço. Os produtos resultantes do *outgassing* podem condensar em elementos óticos, radiadores térmicos ou células solares afetando o seu funcionamento.

A acumulação dos contaminantes pode provocar degradação na transmitância<sup>7</sup> e refletância<sup>8</sup> de instrumentos óticos, na absorvidade solar e na emitância térmica das superfícies dos veículos espaciais. Esta degradação traduz-se também na perda de performance de painéis solares, radiadores, sensores e outros sistemas.

O efeito da contaminação orgânica nas propriedades óticas de dispositivos depende da natureza dos contaminantes e das suas interações com o ambiente espacial. Os contaminantes de hidrocarbonetos, por exemplo, expostos ao oxigénio atómico tendem a formar produtos voláteis que evaporam. Por outro lado, a contaminação com silício pode formar óxidos de silício que afetam a transparência ótica dos materiais. Efeitos semelhantes podem ser encontrados sob a exposição a radiação UV, ou com os dois fatores em simultâneo.

Na presença da luz ultravioleta, ocorre deposição fotoquímica dos contaminantes. Estes formam um filme polimerizado na superfície do veículo. Esta deposição fotoquímica é um processo contínuo, o que constitui uma preocupação para missões de longa duração, designadamente por se poder alterar o balanço radiativo nestas superfícies.

## 2.3. RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

### 2.3.1. Radiação Eletromagnética Solar

A gama de comprimentos de onda da radiação solar ultravioleta (UV) com maior intensidade na órbita LEO está entre os 100 e 400 nm, o que corresponde a uma pequena porção da curva de irradiância espectral solar, medida acima das regiões do topo da atmosfera terrestre (linha preta que se encontra representada na Figura 2.2 (à direita). Na Figura 2.2 (à esquerda) encontra-se também a curva de irradiância solar, mas em função da energia do fóton. Este espectro é designado espectro AM0. Este acrónimo surge a partir da expressão “*air mass zero*”, o que significa que o espectro foi obtido sem ar entre o Sol e o recetor, isto é, “zero atmosferas”.

A constante solar  $S$  corresponde a cerca de 8% para a gama de comprimentos de onda entre os 100 e 400 nm, sendo esta constante definida como a energia total fornecida pelo Sol sobre todos os comprimentos de onda superiores a 1000  $\mu\text{m}$  e o seu valor de referência é o de 136.7  $\text{mW}/\text{cm}^2$  [3]. A constante solar variou menos de 0.2  $\text{W}/\text{m}^2$  (0.015%) nos últimos 1000 anos.

Todas as naves espaciais e satélites fora da atmosfera terrestre e com vista direta do sol estão sujeitas a todo o espectro solar. Ainda que as superfícies dessas naves espaciais não tenham vista direta do Sol, apenas vista direta da Terra, podem ainda sofrer efeitos da radiação ultravioleta, por mor do albedo da Terra, que corresponde à energia do Sol refletida pela atmosfera do planeta.

Relativamente aos efeitos da radiação ultravioleta em materiais espaciais, é importante referir que as reações de degradação induzidas por UV são potenciadas pelo oxigénio atómico. Este último é criado por foto-dissociação do oxigénio molecular através da radiação UV. De todo o espectro UV, o VUV (*vacuum UV* - compreende a região entre os 100 aos 200 nm do espectro eletromagnético) é aquele que mais influencia a degradação dos materiais, sendo prática comum na indústria espacial testar os materiais face a oxigénio atómico seguido de exposição a VUV e submissão a ciclos térmicos. Para testar os materiais face a VUV são usadas lâmpadas de VUV em câmaras de vácuo.

---

<sup>7</sup> Na ótica e espectroscopia, a transmitância é a fração de luz incidente com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra de matéria.

<sup>8</sup> A refletância é a proporção entre o fluxo de radiação refletido e o incidente numa superfície e é apresentada, frequentemente, sob a forma de percentagem.

São muito empregados, atualmente, materiais poliméricos (por exemplo, tintas) para as superfícies de naves espaciais e satélites, em especial para as suas antenas parabólicas e sistemas de controlo térmico [4]. Estes são, desta forma, particularmente vulneráveis à degradação advinda da radiação solar incidente, que, por sua vez, contém comprimentos de onda suficientemente pequenos, portanto, energias elevadas, para quebrar ligações químicas em moléculas orgânicas. O desempenho destes materiais, no espaço, influencia diretamente o tempo de vida da nave ou do satélite.

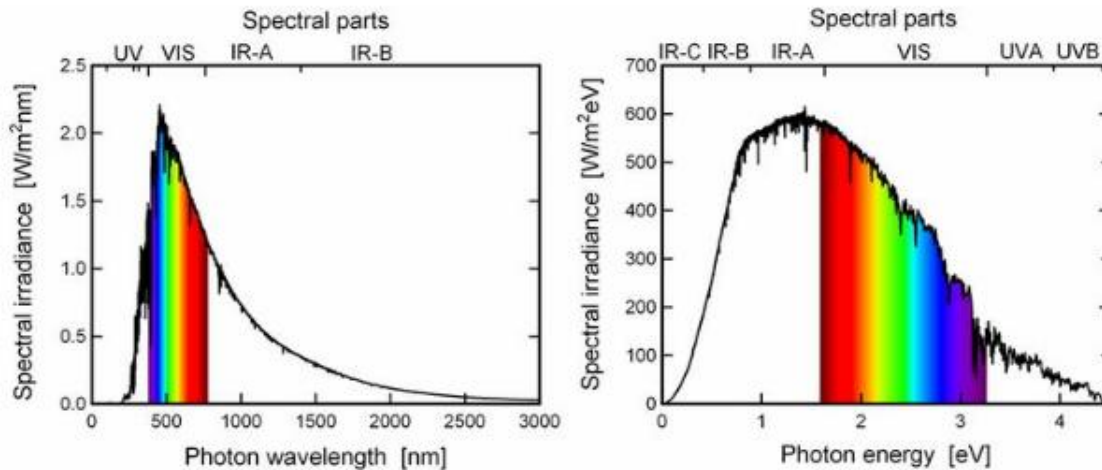


Figura 2.2 – Espectro da irradiância do Sol medida acima do topo da atmosfera (à esquerda); Curva da irradiância solar em função da energia dos fótons (à direita).

## 2.4. EFEITOS TÉRMICOS E DOS CICLOS TÉRMICOS

O ambiente espacial nas órbitas da Terra é suscetível de provocar variações significativas de temperatura, no momento em que os satélites ou naves espaciais transitam da sombra para a exposição direta da luz solar. O número de ciclos térmicos esperado para uma missão depende da órbita. Na órbita LEO uma órbita é completada a cada 90 minutos, enquanto que na órbita GEO só a cada 24 horas é que uma órbita se completa.

O efeito dos ciclos térmicos que é experimentado pelos materiais depende das suas propriedades termo-óticas (absorvidade solar e emitância), do ângulo de inclinação face ao sol e à terra, dos períodos em que se encontra ao sol e à sombra e se possui componentes que produzem calor.

As temperaturas e os ciclos térmicos, em órbita, influenciam de forma negativa a durabilidade dos materiais. Para materiais que se encontram em contacto uns com os outros, um desfasamento entre os seus coeficientes de expansão térmica é suscetível de provocar fissuras e mesmo ruturas dos materiais.

Alguns materiais, de que são exemplo os polímeros, possuem propriedades mecânicas que são fortemente influenciadas pela temperatura. Durante os ciclos térmicos, estes materiais podem experimentar diferentes temperaturas capazes de fazer diminuir a sua rigidez ou a sua ductilidade, tornando-os mais suscetíveis a danos.

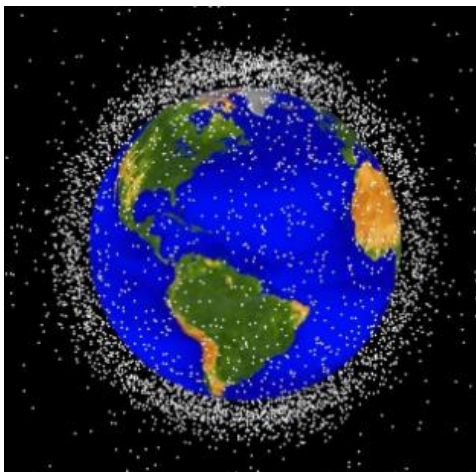
## 2.5. EFEITOS DE MICROMETEORITOS E DETRITOS ORBITAIS

A velocidade dos micrometeoritos adquire, tipicamente, valores entre os 4 e os 51 km/s, sendo a velocidade média próxima de 20 km/s [2]. A sua origem é extraterrestre e o seu fluxo é aproximadamente constante no tempo.

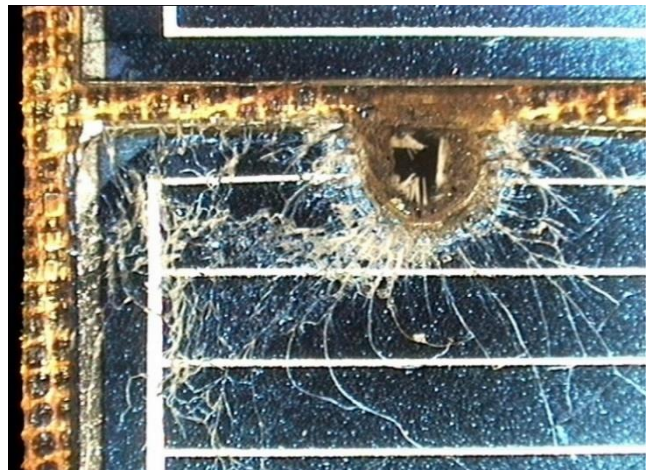
Os detritos orbitais constituem o “lixo” espacial, isto é, o conjunto de objetos feitos pelo Homem extintos no espaço, como, por exemplo, satélites que deixaram de funcionar, fragmentos ou elementos parcelares de naves espaciais, fragmentos sólidos resultantes da emissão do combustível dos veículos espaciais e

fragmentos da desintegração, erosão e colisões. Estes possuem uma velocidade média de 8.7 km/s [2] e o seu fluxo, como seria de esperar, depende fortemente da frequência de lançamentos de naves espaciais e satélites para o espaço e da frequência com que os danos neles ocorrem. A maioria dos detritos orbitais encontra-se na órbita LEO. Mais de 500 mil pedaços de detritos são observados e controlados à medida que orbitam a Terra [5]. Na figura 2.3, podem observar-se os detritos orbitais na órbita LEO, a imagem foi captada pela NASA.

O impacto de micrometeoritos e de detritos com os materiais espaciais é, regra geral, suficientemente energético para provocar a vaporização da partícula que colide e para produzir uma cratera cujo volume é uma ordem de grandeza superior à partícula de impacto. A ejeção de materiais resultante da formação da cratera de impacto pode ser uma das fontes de contaminação da nave espacial e o impacto de partículas de grande dimensão pode causar danos estruturais que impossibilitam a prossecução da missão. Na figura 2.4, pode-se observar o estrago provocado pelo impacto de detritos.



*Figura 2.3 - A órbita LEO é a mais concentrada em detritos orbitais. [23]*



*Figura 2.4 - Estrago provocado pelo impacto de detritos orbitais num painel solar do telescópio Hubble. [24]*

Os materiais dos satélites e naves espaciais expostos ao ambiente espacial sofrem degradação e danos devido a vários agentes, entre eles o oxigénio atómico, a contaminação, a radiação, o efeito da temperatura e dos ciclos térmicos, e os micrometeoritos e detritos orbitais. Dependendo das propriedades dos materiais das naves espaciais, os efeitos provocados pelos agentes do ambiente espacial podem ser significantes ou não, e as interações que ocorrem no processo de degradação tornam-se bastante complexas. Para que as missões sejam bem sucedidas, é necessário proceder a uma previsão do comportamento dos materiais que serão expostos ao ambiente espacial.

Desde o primeiro lançamento que foram feitos avanços significativos para compreender o efeito dos vários agentes do ambiente espacial nos materiais, por meio de métodos de simulação em laboratório que permitem reproduzir os danos causados de forma acelerada. Estes requerem uma interpretação cautelosa dos resultados tendo em conta a existência de diferenças significativas e complexas entre os ambientes espaciais e o de laboratório.

Avanços no estudo de mecanismos de degradação e no desenvolvimento de testes de simulação de durabilidade são necessários e de extrema importância, pois as missões espaciais são cada vez mais longas e exigem materiais mais leves. Só estes poderão garantir a precisão na previsão da durabilidade dos materiais a longo prazo, no espaço, para missões futuras.

### 3. Radiação UV/VUV

A radiação ultravioleta tem-se tornado cada vez mais importante nos últimos anos com o progresso das tecnologias necessárias para sistemas de imagem práticos de laser de UV, sistemas de condução do feixe, e fontes de luz de UV. Historicamente, a radiação ultravioleta tem estado disponível apenas através de lâmpadas de potência baixa, restringindo, assim, a utilidade da tecnologia. O excimer laser, que foi descoberto em 1980, tornou possível, pela primeira vez, a geração de luz ultravioleta intensa.

A luz ultravioleta, como já foi referido no capítulo anterior, corresponde à porção do espectro eletromagnético compreendida entre os 100 e os 400 nm de comprimento de onda.

A luz ultravioleta que possui os menores comprimentos de onda designa-se *vacuum* UV (VUV), também designada de UV distante (*far* VUV). Esta compreende os comprimentos de onda entre os 100 aos 200 nm. O ar torna-se opaco a estes comprimentos de onda, o que requer que experiências feitas com este tipo de radiação sejam executadas em vácuo ou num gás inerte, de forma a que o ar não absorva toda a luz ultravioleta.

Os UV profundos (*deep* UV) correspondem à região do ultravioleta compreendida entre os 200 e os 280 nm. É esta gama de ultravioleta que é utilizada em sistemas de imagiologia. Trabalhos com este tipo de radiação podem ser executados à atmosfera sem quaisquer implicações.

Os UV médios (*middle* UV) compreendem a região de comprimentos de onda entre os 280 e os 315 nm.

Os ultravioleta próximos (*near* UV) consistem na região entre os 315 e os 400 nm. É assim designada pois representa a porção do UV mais próxima da região do visível do espectro eletromagnético.

#### 3.1. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA COM A MATÉRIA

A porção UV do espectro eletromagnético é de particular importância na determinação dos efeitos da radiação solar nas propriedades dos materiais. Esta radiação é suficientemente energética para quebrar ligações orgânicas. Apesar da radiação solar abaixo dos 200 nm representar menos de 0.001% da constante solar, a sua presença pode promover a quebra de ligações estruturais orgânicas importantes, como a C-C e C-O, e grupos funcionais.

A interação da luz ultravioleta com materiais sólidos é um fenómeno extremamente complexo que está ainda a ser estudado. Alguns dos eventos que ocorrem com esta interação incluem absorção, excitação eletrónica, aquecimento rápido, formação de plasma, fotólise<sup>9</sup>, pulverização catódica, fusão, expansão, decomposição, vaporização, oxidação, sublimação, condensação e solidificação. Estes podem ocorrer em simultâneo ou separados.

A absorção de fótons de UV por moléculas orgânicas e inorgânicas gera excitação eletrónica. Esta absorção corresponde a processos complexos e variam dependendo do comprimento de onda da radiação ultravioleta, do meio envolvente, das propriedades do material irradiado e das condições de pressão e temperatura. Quando a radiação ultravioleta é absorvida pela superfície de um sólido, a energia eletromagnética da radiação é convertida em energia térmica, química e elétrica, e podem resultar detritos que incluem átomos, moléculas, iões, fótons, eletrões e aglomerados ou fragmentos do material irradiado.

A energia de ligação típica para muitas moléculas está entre os 3 aos 15 eV, o que corresponde aproximadamente à gama de energia de fótons no ultravioleta. Os fótons de UV, desde 157 a 308 nm, possuem energia suficiente para quebrar as ligações de uma variedade de materiais.

---

<sup>9</sup> Também designada de fotodissociação ou ainda fotodecomposição. Consiste na dissociação de moléculas orgânicas complexas por efeito da radiação eletromagnética.

A absorção de fótons na superfície de um material sólido produz uma série de reações físico-químicas. Uma absorção intensa de fótons de UV causa o aquecimento da superfície do material até várias centenas de graus Celsius e pode causar fotodecomposição. Os produtos da fotodecomposição têm um volume específico maior do que o material original que não foi exposto à radiação, dando origem à expansão explosiva e transporte de massa para longe da superfície do sólido irradiado. O movimento do material formado na fotodecomposição é praticamente normal à superfície.

A exposição intensa de UV também leva a que moléculas e átomos do material irradiado transitem para estados excitados. Esta transição é seguida de relaxação e emissão de fótons de diferentes comprimentos de onda. A este processo chama-se fluorescência. Os elevados níveis de excitação alcançados nestas reações também causam ejeção de eletrões, processo que se designa fotoionização.

Os fótons de UV possuem a propriedade única de serem totalmente absorvidos no topo da superfície de um material. As reações que se desenvolvem à superfície dos materiais são muito úteis em aplicações associadas à limpeza de materiais, sistemas de imagem, entre outras. Uma das fontes de UV (lasers ou lâmpadas) muito utilizada é o excimer laser, que produz fótons de UV altamente energéticos. Estes são absorvidos por uma série de filmes finos de semicondutores, incluindo polímeros, óxidos, vidros e metais. Normalmente a absorção é apenas superficial, como foi indicado, e está confinada a uma camada com uma espessura tipicamente inferior a 2500 Å [6].

Os polímeros são particularmente suscetíveis à degradação devida à radiação VUV na medida em que muitos tipos de ligações em polímeros orgânicos conseguem absorver luz VUV que resulta em reações fotoquímicas [2]. Esta radiação pode conduzir à sua degradação produzindo alterações a nível ótico e mecânico. Pode ocorrer reticulação de superfícies de polímeros, o que por sua vez pode levar à sua fragilização e, possivelmente, a fendas superficiais.

Filmes de polímeros são muitas vezes usados para controlo térmico nas naves espaciais e satélites e devem possuir as propriedades óticas necessárias (absorvidade solar e emitância térmica), flexibilidade e serem fáceis de fabricar e instalar. O Teflon FEP (etileno propileno fluorado) é um dos materiais de controlo térmico e este tem sido estudado, verificando-se, tanto no espaço como em laboratório, que se degrada e torna frágil após exposição a radiação VUV a longo prazo [7].

Para que um polímero seja danificado, a radiação tem de ser absorvida ou depositada no polímero. Na região de comprimentos de onda da radiação VUV, medições de absorção, executadas pelo NIST (*National Institute for Standards and Technology*), no Teflon PTFE (politetrafluoretileno), muito idêntico ao Teflon FEP, indicam um pico de absorção muito forte centrado nos 160 nm de comprimento de onda [7]. Medições de transmitância espectral, feitas também por este instituto, mas desta vez em Teflon FEP, revelam que praticamente toda a radiação VUV abaixo dos 200 nm é absorvida até uma espessura de 127 µm. Através das medições realizadas, chegou-se à conclusão de que a radiação VUV com comprimentos de onda mais pequenos é mais absorvida por superfícies finas em comparação com comprimentos de onda mais longos.

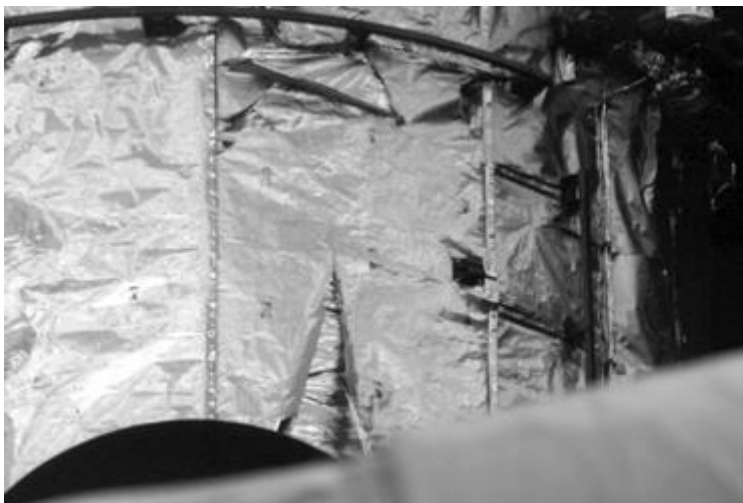


Figura 3.1 - MLI (Multilayer Insulation) de FEP utilizado no telescópio espacial Hubble (HST) que foi lançado na órbita LEO em Abril de 1990. [22]

Adicionalmente, impurezas, que estão contidas nos polímeros sintéticos, absorvem mais a luz VUV do que o próprio polímero, e contribuem significativamente para as reações fotoquímicas dentro do polímero. Estas reações podem resultar em efeitos, tais como a descoloração do material ou a perda de propriedades mecânicas, decorrente de alterações químicas no material. As alterações químicas nas moléculas como resultado destas reações podem também conduzir à formação de grupos polares que poderão afetar propriedades elétricas.

As considerações a ter em conta para a durabilidade dos polímeros no espaço, sujeitos a radiação UV, são os comprimentos de onda que levam à degradação, a profundidade da degradação e efeitos sinérgicos com outros fatores ambientais. Os polímeros absorvem aproximadamente 95% da radiação incidente abaixo dos 250 nm dentro de 0.3  $\mu\text{m}$  a partir da superfície [8].

Na Figura 3.2 representam-se os comprimentos de onda necessários para quebrar várias ligações de polímeros.

As interações da radiação UV em vidro e materiais cerâmicos podem provocar a formação de eletrões ou buracos que ficam presos em vários defeitos. A luz é absorvida por estas espécies presas em gamas de comprimentos de onda específicas e são designadas como “centros de cor”. A forma e o tamanho das partículas, a pureza e a constituição química do material são alguns dos fatores que influenciam o escurecimento do material por parte da radiação UV. Este escurecimento é prejudicial para os materiais espaciais como aqueles com revestimentos de tinta branca e para os vidros das células solares.

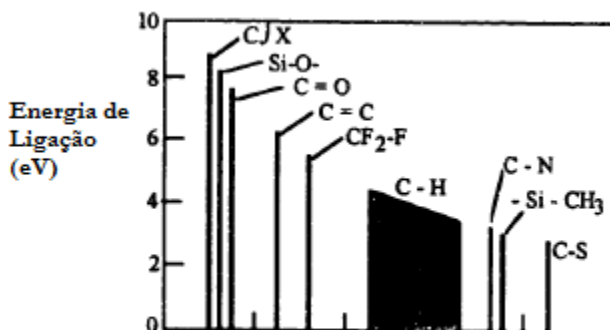


Figura 3.2 – Comprimentos de onda necessários para quebrar várias ligações de polímeros.

A radiação UV/VUV desempenha, então, um papel significativo na contaminação e degradação de materiais espaciais através das reações fotoquímicas que induz. Este mecanismo é mesmo designado de contaminação fotoquímica. As reações fotoquímicas de contaminantes moleculares sob irradiação solar mais esperadas são a foto-dimerização, foto-polimerização, foto-dissociação e fotólise [9].



## 4. Introdução à Radiometria

Define-se radiometria como a medição da energia de radiação ótica, que, por sua vez, se constitui radiação eletromagnética, compreendida na gama de frequências entre os  $3 \times 10^{11}$  e os  $3 \times 10^{16}$  Hz. Esta gama corresponde a comprimentos de onda entre os 10 nm e os 1000  $\mu\text{m}$ , e inclui as regiões comumente denominadas ultravioleta, visível e infravermelha.

### 4.1. PROPAGAÇÃO DE RADIAÇÃO ÓTICA

#### 4.1.1. Raios e Ângulos

Um raio representa-se por um vetor a indicar a direção de propagação e a magnitude. Uma frente de onda é uma superfície imaginária normal a um raio, que, tanto pode ser curva, indicando, neste caso, raios divergentes (como que provenientes de um ponto), como pode ser plana, o que se aplica a raios que vêm do infinito e são paralelos. O vetor de Pointing que descreve a densidade de fluxo de energia eletromagnética surge, em cada ponto, normal à frente de onda e aponta no sentido da propagação dela.



Figura 4.1 – (a) Frente de onda plana; (b) Frente de onda curva.  
As setas indicam a direção de propagação da radiação.

A velocidade da luz no vácuo, representada por  $c$ , equivale a um valor de  $3.00 \times 10^8$  m/s. O índice de refração  $n$  de um meio é dado pelo rácio entre a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz  $v$ , nesse mesmo meio:

$$n = c/v$$

O índice de refração de qualquer meio estará sempre constrangido a valores iguais ou superiores a 1, dado que velocidade da luz no vácuo é por norma superior à velocidade da luz  $v$ .

A área projetada é a projeção retilínea e paralela de uma superfície de qualquer forma sobre um plano normal ao vetor unitário. Esta definição traduz-se na forma diferencial  $dA_p = \cos\theta \, dA$ , onde  $A_p$  é a área projetada,  $A$  a área original e  $\theta$  o ângulo entre a normal da superfície  $A$  e a linha de observação. Na seguinte equação surge descrita a integração sobre a área da superfície:

$$A_p = \int_A \cos\theta \, dA \quad (4.1)$$

Na tabela seguinte podem observar-se alguns exemplos comuns de áreas projetadas.

Tabela 4-1 – Exemplos de áreas projetadas. Na tabela,  $l$  é a largura do retângulo e  $w$  a sua altura,  $r$  o raio do círculo ou da esfera e  $d$  o diâmetro do círculo ou da esfera.

Forma geométrica	Área	Área Projetada
<b>Retângulo</b>	$A=l \times w$	$A_p=l \times w \cos\theta$
<b>Círculo</b>	$A=\pi r^2=\pi d^2/4$	$A_p=\pi r^2 \cos\theta=\pi d^2 \cos\theta/4$
<b>Esfera</b>	$A=4\pi r^2=\pi d^2$	$A_p=A/4=\pi r^2$

Na Figura 4.2 encontra-se retratado o ângulo plano  $\theta$ , sendo  $l$  o comprimento do arco e  $r$  o raio da circunferência. A unidade do ângulo plano é o radiano, cuja definição se apresenta da forma seguinte, segundo o NIST SP811: “O radiano é o ângulo plano compreendido entre dois raios de um círculo que corta na circunferência um arco com comprimento igual ao raio”.

O ângulo sólido estende o conceito para três dimensões. A unidade deste é o esterradiano e define-se de forma semelhante também, segundo o NIST SP811: “Um esterradiano (sr) é o ângulo sólido que, tendo o seu vértice no centro da esfera, corta uma área na superfície da esfera igual à de um quadrado com lados de comprimento igual ao do raio da esfera”.

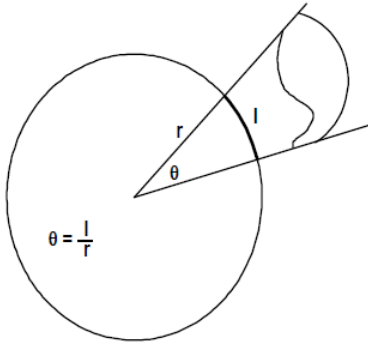


Figura 4.3 – Ângulo plano e relações.

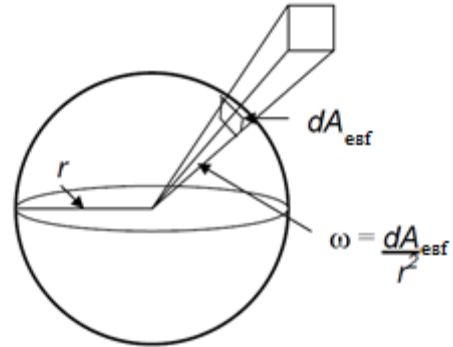


Figura 4.2 - Ângulo sólido e relações.

O ângulo sólido é, então, a razão entre a área esférica  $A_{\text{esf}}$  e o raio ao quadrado (Figura 4.3). A área esférica corresponde à projeção do objeto de interesse sobre uma esfera unitária, e o ângulo sólido à área de superfície dessa projeção. O símbolo usado para o ângulo sólido é o  $\omega$ .

Uma esfera corresponde a  $4\pi$  esterradianos de ângulo sólido e um hemisfério a  $2\pi$  esterradianos.

A Figura 4.5 retrata o ângulo sólido em função do ângulo plano  $\theta$  e o ângulo rotacional  $\varphi$ , onde  $r$  é o raio da esfera. O elemento de área  $dA_{\text{esf}}$  pertence à superfície da esfera. O elemento de ângulo sólido subentendido por  $dA_{\text{esf}}$  é expresso da seguinte forma:

$$d\omega = \frac{dA_{\text{esf}}}{r^2} = \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \quad (4.2)$$

Através da seguinte equação determina-se o valor do ângulo sólido, integrando sobre  $\theta$  e  $\varphi$ :

$$\omega = \int_{\varphi} \int_{\theta} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \quad (4.3)$$

Tendo em conta as aberturas circulares dos sistemas óticos, o ângulo sólido subentende a superfície de um cone circular (Figura 4.4, onde  $\Theta_{1/2}$  é o semiângulo do cone, isto é, corresponde ao ângulo plano entre a

linha central do cone e qualquer ponto da extremidade do cone). O ângulo sólido  $\omega$  e o semiângulo do cone relacionam-se do seguinte modo:

$$\omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\Theta_{1/2}} \sin \theta d\theta \rightarrow \omega = 2\pi(1 - \cos \Theta_{1/2}) \quad (4.4)$$

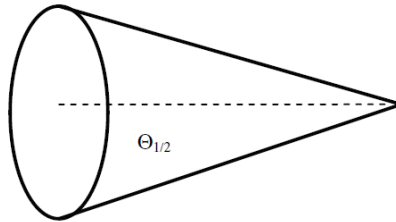


Figura 4.4 – Cone circular. Semiângulo  $\Theta_{1/2}$ .

No âmbito da análise dimensional, tanto o uso de ângulos planos como de ângulos sólidos pode ser gerador de confusão. Para situações semelhantes poderem ser contornadas, é frequente a prática corrente de se usar um tipo distinto de ângulo sólido – o ângulo sólido projetado. Para este ângulo o símbolo usado é o  $\Omega$  e a sua unidade é, igualmente, o esterradiano. A relação que descreve o ângulo sólido projetado em função do ângulo sólido é a seguinte:

$$d\Omega = d\omega \cos \theta = \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi \quad (4.5)$$

E o ângulo sólido projetado é, assim, definido como o ângulo sólido  $\omega$  projetado sobre o plano do observador. Para se compreender melhor a distinção entre os mesmos, apresenta-se, seguidamente, uma figura que retrata as relações do ângulo sólido projetado.

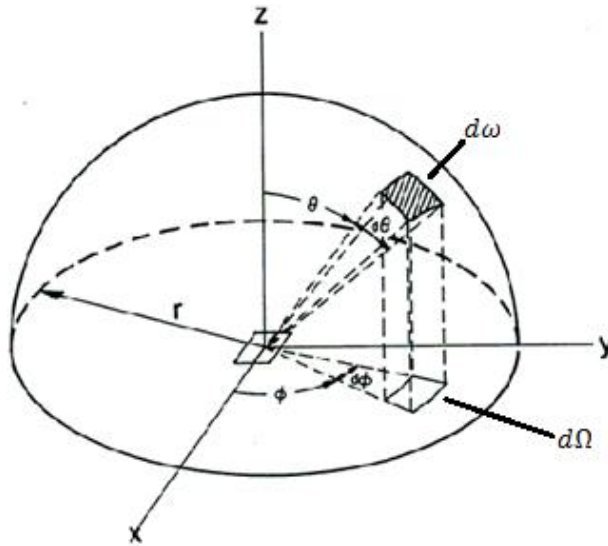


Figura 4.5 – Ângulo sólido projetado e sua relação com o ângulo sólido.

Integrando sobre  $\theta$  e  $\varphi$ , obtém-se a seguinte equação:

$$\Omega = \int_{\varphi} \int_{\theta} \sin \theta \cos \theta d\theta d\varphi \quad (4.6)$$

O ângulo sólido projetado pode ainda ser escrito em relação ao semiângulo  $\Theta_{1/2}$  descrito anteriormente:

$$\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta_{1/2}} \sin \theta \cos \theta d\theta \leftrightarrow \Omega = \pi (\sin \theta_{1/2})^2 \quad (4.7)$$

## 4.2. QUANTIDADES RADIOMÉTRICAS FUNDAMENTAIS

O estudo da radiometria principia com as unidades fundamentais. A energia radiante, representada pelo símbolo  $Q$ , tem como unidade o joule (J). A potência radiante, conhecida igualmente por fluxo radiante, é a energia por unidade de tempo ( $dQ/dt$ ) medida em watts (W) e assume a sua representação no símbolo  $\Phi$ . Estas definições não dão qualquer indicação quanto à distribuição espacial da potência em termos de área ou direção.

### 4.2.1. Radiância

A radiância define-se como a quantidade elementar da radiometria. Esta é, por sua vez, o fluxo radiante emitido, refletido, transmitido ou recebido por unidade de área e por unidade de ângulo sólido projetado. O símbolo usado para esta quantidade é o  $L$  e as suas unidades são  $W/m^2sr$ . As equações que a definem são as que se passa a enunciar:

$$L = \lim_{\Delta A_{esf}, \Delta \omega \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta A_{esf} \cos \theta \Delta \omega} = \frac{d^2 \Phi}{dA_{esf} \cos \theta d\omega} = \frac{d^2 \Phi}{dA_{esf} d\Omega} = \frac{d^2 \Phi}{dA_p d\omega} \quad (4.8)$$

em que  $\theta$  é o ângulo entre a normal à fonte de luz e a direção de observação, como é observável na Figura 4.6.

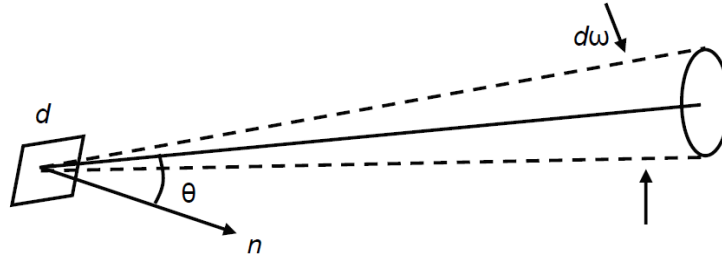


Figura 4.6 – Radiância a partir de um elemento de área  $dA$ , com inclinação  $\theta$  segundo a normal  $n$  da superfície.

Se se integrar a radiância sobre o ângulo sólido obtém-se a irradiância ou a emitância, ambas expressas em  $W/m^2$ . Se a integração se der segundo a área, surge a intensidade radiante em  $W/sr$ . Caso seja sobre ambos, isto é, área e ângulo sólido, obtém-se a potência radiante em watts.

A potência radiante ao longo de um feixe é conservada, desde que não existam, no percurso do feixe, fontes ou dissipadores. Deste modo, a radiância é invariante, de forma a que exista conservação da potência. Para determinar a potência num sistema ótico, pode inverter-se a equação que define a radiância e integrar sobre a área:

$$\Phi = \iint L dA_{esf} d\omega_{esf} \cos \theta = \iint L dA_{esf} d\Omega \quad (4.9)$$

### 4.2.2. Emitância

A emitância é a radiação emitida pela fonte e que se representa por  $M$ . As suas unidades são  $W/m^2$  e é, portanto, definida como a potência radiante emitida por unidade de área num hemisfério ( $d\Phi/dA$ ). Na Figura 4.7, está retratado o conceito desta grandeza. A equação que a define é a seguinte:

$$M = \lim_{\Delta A_{esf} \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta A_{esf}} = \frac{d\Phi}{dA_{esf}} \quad (4.10)$$

Através da integração da radiância sobre o ângulo sólido projetado de um hemisfério, obtém-se a emitância de uma fonte:

$$M = \int_{\pi} L d\Omega \quad (4.11)$$

De modo a determinar-se a potência radiante em watts, a emitância em W/m<sup>2</sup> é integrada sobre a área:

$$\Phi = \int_A M dA_{esf} \quad (4.12)$$

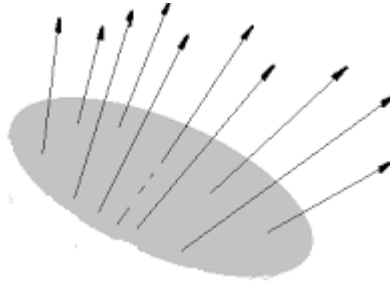


Figura 4.7 - Emitância de uma fonte.

#### 4.2.3. Irradiância

A irradiância E, ou radiância incidente, representa a quantidade de potência radiante que incide sobre uma superfície por unidade de área, sendo as suas unidades W/m<sup>2</sup>. Na Figura 4.8, está retratado o conceito de irradiância. Esta é descrita através da seguinte equação:

$$E = \lim_{\Delta A_{esf} \rightarrow 0} \frac{\Delta \Phi}{\Delta A_{esf}} = \frac{d\Phi}{dA_{esf}} \quad (4.13)$$

Da integração da radiância sobre o ângulo sólido projetado, resulta a irradiância numa superfície:

$$E = \int_{\pi} L d\Omega \quad (4.14)$$

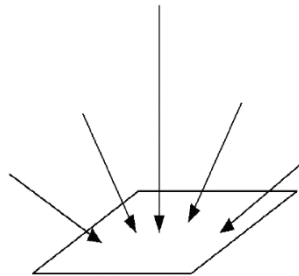


Figura 4.8 - Irradiância sobre uma superfície.

A potência incidente é obtida com a integração da irradiância sobre a área:

$$\Phi = \int_A E dA \quad (4.15)$$

#### 4.2.4. Intensidade Radiante

A intensidade radiante  $I$  define-se como a potência emitida, refletida, transmitida ou recebida por unidade de ângulo sólido e as suas unidades são W/sr. Esta grandeza é amplamente utilizada quando se descreve a radiação de uma fonte pontual isotrópica (a mesma em todas as direções). Define-se através das seguintes equações:

$$I = \lim_{\Delta\omega_{esf} \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi}{\Delta\omega_{esf}} = \frac{d\Phi}{d\omega_{esf}} \quad (4.16)$$

Esta deriva da radiância por integração sobre a área:

$$I = \int_A L dA \quad (4.17)$$

e a potência radiante pode ser descrita a partir da intensidade através da integração da mesma sobre o ângulo sólido  $\omega$ :

$$\Phi = \int_{\omega} I d\omega \quad (4.18)$$

#### 4.3. GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS ESPETRAIS

As grandezas radiométricas introduzidas anteriormente descrevem a radiação total, sem que se discrimine os comprimentos de onda componentes. Torna-se assim mesmo possível e necessário usar grandezas radiométricas espectrais que têm em conta a contribuição de cada comprimento de onda, isto é, a composição espectral da radiação. Estas grandezas são definidas como o quociente da quantidade de comprimentos de onda num intervalo infinitesimal dividida por esse intervalo de comprimentos de onda. Quando integradas sobre os comprimentos de onda, estas cedem a quantidade total.

As grandezas espectrais radiométricas representam densidades das correspondentes grandezas radiométricas por unidade de intervalo de comprimento de onda. Deste modo, a uma grandeza radiométrica  $X$  corresponde uma grandeza radiométrica espectral  $X_{\lambda}(\lambda)$  dada através da equação seguinte:

$$X_{\lambda}(\lambda) = \frac{\partial X}{\partial \lambda} \quad (4.19)$$

A grandeza radiométrica  $X$  associada a uma grandeza espectral  $X_{\lambda}(\lambda)$  representa a área sob a curva de  $X_{\lambda}(\lambda)$ , podendo ser calculada através do integral:

$$X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (4.20)$$

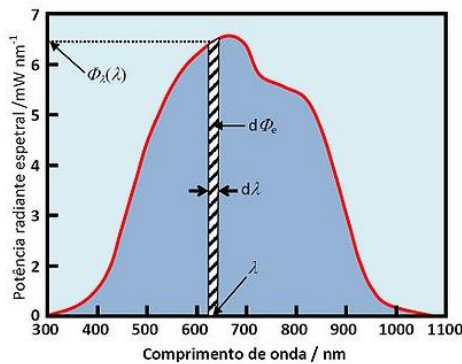


Figura 4.9 – A grandeza radiométrica representa a área sob a curva a vermelho.

#### 4.4. APROXIMAÇÕES RADIOMÉTRICAS

Existem várias aproximações na radiometria e a maior parte tem a ver com a geometria da radiação. Estas aproximações facilitam os cálculos em diversos casos.

##### 4.4.1. Lei do Inverso do Quadrado

A Lei do Inverso do Quadrado da irradiância resulta diretamente da conservação da totalidade de radiação que atravessa superfícies consecutivas de áreas diferentes sem que haja absorção ou emissão (Teorema de Gauss associado ao vetor de Pointing). A irradiância de uma fonte pontual isotrópica varia inversamente com o quadrado da distância à fonte.

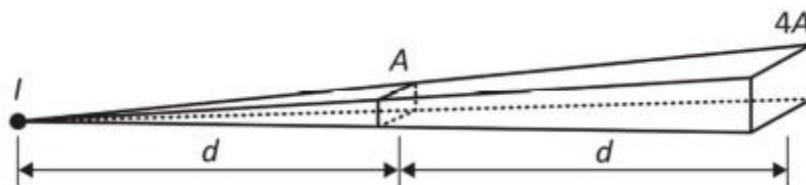


Figura 4.10 – Ilustração da lei do inverso do quadrado.

Como é observável na Figura 4.10, os raios partem de uma fonte de intensidade  $I$ . A uma distância  $d$ , os raios preenchem uma área  $A$ , a uma distância  $2d$ , o comprimento de cada lado passa ao dobro e, conseqüentemente, a área aumenta num fator de quatro. A quantidade de potência radiante na segunda superfície é a mesma que na primeira superfície, devido à conservação de energia, isto considerando um meio sem perdas. Na segunda superfície, a potência radiante está espalhada por uma área maior e a irradiância diminui. A relação entre a irradiância e a distância é dada pela seguinte equação:

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{I}{d^2} \quad (4.21)$$

Deste modo, se se medir  $16 \text{ W/cm}^2$  a um metro, irá medir-se  $4 \text{ W/cm}^2$  a dois metros, e pode calcular-se a irradiância para outra qualquer distância. Uma forma alternativa é, quase sempre, mais conveniente:

$$E_1 d_1^2 = E_2 d_2^2 \quad (4.22)$$

A Equação 4.21 assume que a área da Figura 4.10 é normal ao eixo ótico. Para a situação em que a superfície esteja inclinada segundo um ângulo  $\theta$  em relação ao eixo ótico, deve ser incluído o fator cosseno de  $\theta$  na equação, o que resulta em:

$$E = \frac{I \cos \theta}{d^2} \quad (4.23)$$

Esta situação encontra-se ilustrada na Figura 4.11.

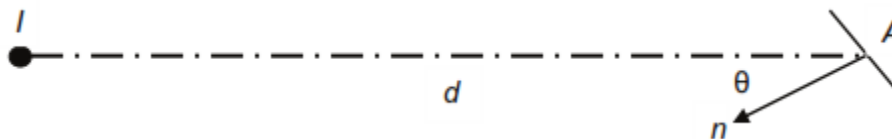


Figura 4.11 – Área com uma inclinação  $\theta$  em relação ao eixo ótico.

##### 4.4.2. Lei do Cosseno<sup>3</sup>

A lei do cosseno<sup>3</sup>, também denominada lei do cosseno de Lambert, é uma distribuição efetiva aplicada para calcular a irradiância numa superfície plana, a partir de uma fonte pontual isotrópica. Na Figura 4.12,

a irradiância num ponto x, diretamente abaixo da fonte de intensidade I, pode ser calculada de acordo com a lei do inverso do quadrado através de:

$$E_x = \frac{I}{D^2} \quad (4.24)$$

Na posição y, a distância até à fonte aumenta de tal modo que se tem  $d=D/\cos\theta$ . Se o alvo no ponto y for perpendicular ao vetor entre a fonte e o alvo, a irradiância em y é dada por:

$$E_y = \frac{I}{d^2} = \frac{I(\cos\theta)^2}{D^2} \quad (4.25)$$

Se o alvo for paralelo à superfície x-y (caso da Figura 4.12), é introduzido um termo adicional de  $\cos\theta$ , que resulta em:

$$E_y = \frac{I(\cos\theta)^3}{D^2} \quad (4.26)$$

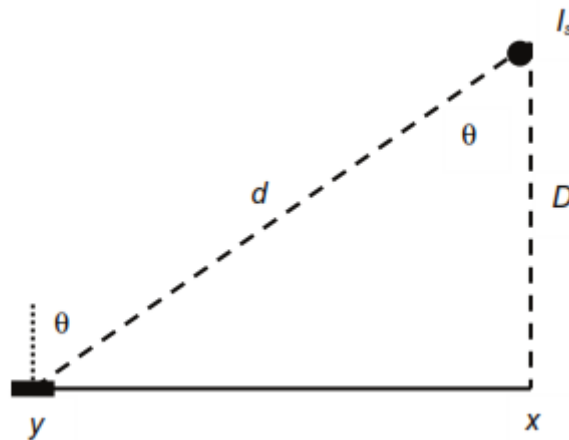


Figura 4.12 – Lei do cosseno³.



## 5. Detetor de Radiação

Os detetores de radiação ótica são transdutores que convertem a energia radiante recebida em corrente elétrica proporcional à intensidade da radiação. O detetor deve apresentar alta sensibilidade para uma determinada gama de comprimentos de onda, alta razão sinal/ruído, uma resposta constante numa gama de comprimentos de onda considerável, uma resposta rápida e um sinal eletrónico que seja facilmente amplificado para poder ser registado.

Tanto detetores térmicos como os detetores fotoelétricos convertem a energia incidente em sinais elétricos. Nos primeiros, a radiação não é detetada, mas sim a variação de temperatura devida à radiação incidente. Ambos os tipos podem ser formados por um único elemento ou por uma matriz de elementos de uma ou duas dimensões (*one-* ou *two-dimensional arrays*), sendo estes últimos mais usados para sistemas de formação de imagem. Na tabela seguinte estão mencionados os principais tipos de detetores térmicos e fotoelétricos.

Tabela 5-1 – Detetores térmicos e fotoelétricos.

	Detetores Térmicos	Detetores Fotoelétricos
De um elemento	Termopar	Fotocondutor
	Bolómetro	Fotodíodo
De vários elementos	Piroelétrico vidicon	Array de CCD
	Array linear	Array de CMOS
	Termoelétrico	
	Array Microbolómetro	Array de fotodíodos de UV

Os detetores térmicos são, geralmente, detetores com uma resposta mais lenta e com uma baixa detetividade (vem do termo inglês *detectivity* - figura de mérito de detetores de radiação ótica que será explicada mais a diante).

Para escolher o detetor adequado para um determinado sistema é necessário ter vários fatores em consideração. A sensibilidade à banda de comprimentos de onda de interesse é uma das primeiras considerações a ter quando se escolhe um detetor. É possível controlar o pico de sensibilidade radiante e a largura de banda através de filtros, contudo é necessário ter à partida um sinal adequado. Outro aspeto de grande importância é o facto de o detetor ser apenas sensível à gama de radiação que se pretende medir caso este esteja num sistema onde pode ser exposto a outro tipo de comprimentos de onda que não são de interesse e podem afetar as medições. Por último, a linearidade, a estabilidade e a durabilidade também são fatores a ter em conta. Também existem detetores que necessitam de ser arrefecidos para se manterem estáveis e também aqueles que requerem altas tensões de alimentação. Outros podem ser destruídos por luz excessiva ou podem ficar com as suas janelas deterioradas por manuseamento descuidado.

Existem vários termos comumente usados para descrever os parâmetros de detetores de radiação, tais como:

- Sensibilidade radiante **R** de um detetor é a razão entre o sinal de saída elétrico do detetor, que tanto pode ser uma corrente  $I_{out}$  como uma tensão  $V_{out}$ , e o sinal de entrada ótico expresso em termos de uma potência radiante incidente  $\Phi$ , integrada sobre o intervalo espectral que é comum à fonte e ao detetor:  $R_i = \frac{I_{out}}{\Phi}$  e  $R_v = \frac{V_{out}}{\Phi}$ , sendo  $R_i$  a sensibilidade

radiante em termos de corrente, expressa em A/W e  $R_v$  em termos de tensão, expressa em V/W. Este parâmetro resulta, então, do quociente entre dois integrais:  $R = \frac{\int R(\lambda)\Phi(\lambda)d\lambda}{\int \Phi(\lambda)d\lambda}$ , onde  $R(\lambda)$  é a sensibilidade radiante espectral e  $\Phi(\lambda)$  a potência radiante espectral. Noutras situações também se podem encontrar sensibilidades radiantes relacionadas com outras quantidades radiométricas, como por exemplo, a sensibilidade radiante tendo em conta a irradiância  $R_E$  em W/m<sup>2</sup> ou tendo em conta a radiância  $R_L$  em W/m<sup>2</sup>sr.

- b) Sensibilidade Radiante Fotónica  $R_q$  é a razão entre o sinal de saída do detetor e o fluxo de fótons de entrada, integrada sobre a gama de comprimentos de onda que é comum tanto para o detetor como para a fonte de luz. O sinal de saída é uma corrente ou uma tensão e o sinal de entrada ótico é um o fluxo de fótons. Esta sensibilidade radiante tem as unidades A.s ou V.s.
- c) Quando o sinal ótico de entrada é periódico com uma amplitude fixa e uma frequência  $f$ , a amplitude do sinal de saída do detetor não é necessariamente constante e pode variar com a frequência. Este fenómeno ocorre devido ao atraso elétrico RC (resistência-capacidade) do dispositivo no caso de detetores de fótons e ao atraso térmico RC no caso de detetores térmicos. A relação entre a sensibilidade radiante e a frequência, associada a este atraso é a seguinte :  $R = R_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$ , onde  $R_0$  é a sensibilidade radiante do detetor a frequências muito

baixas e  $f_c$  é a frequência de corte. A frequência de corte  $f_c$  ( $\omega_c=1/RC$ ) é a frequência a que a tensão ou corrente de resposta do detetor ou do circuito associado a este cai para  $1/\sqrt{2}$  do valor para luz incidente contínua. Está relacionada com a constante de tempo  $\tau=RC$  que é o tempo necessário para que o sinal atinja 63% do seu sinal de saída final, dando um sinal de entrada em degrau.  $R$  é a resistência elétrica (ou térmica) e  $C$  a capacidade elétrica (ou térmica) do detetor de fótons (ou térmico).

- d) O valor médio quadrado (*root-mean-square* - **rms**) de uma quantidade (tensão, por exemplo) é definida como:  $v_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t)dt}$ , onde  $T$  é um período único ou múltiplo inteiro para ondas periódicas.
- e) O sinal é a componente da tensão ou corrente de saída de um detetor que surge devido um sinal de entrada radiométrico. É representado pela seguinte expressão:  $SINAL = \int_0^\infty R(\lambda)\Phi(\lambda)d\lambda$ .
- f) Como o sinal de saída de um detetor é um sinal elétrico está sujeito ao ruído elétrico. O ruído é uma variável da tensão ou corrente de saída do detetor que surge devido a flutuações aleatórias que provêm do circuito eletrónico associado ao detetor, da radiação incidente ou de outras fontes.
- g) A razão sinal-ruído (**SNR** – *Signal-to-noise ratio*) é a razão entre o valor rms da corrente  $i_s$  e o valor rms do ruído em corrente  $i_n$ .
- h) A linearidade é a proporcionalidade da saída para a entrada de um detetor ou instrumento. Esta implica que a sensibilidade radiante do aparelho seja constante sobre uma gama definida de potência de entrada ou de irradiância, ou de outra quantidade radiométrica.

Na radiometria, foram também definidas uma série de figuras de mérito para detetores de radiação. Irei apenas, de seguida, referir as de maior interesse:

- a) A eficiência quântica RQE (Responsive Quantum Efficiency -  $\eta$ ) é o número de eventos de saída independentes por fóton incidente. É comumente expressa em eletrões por fóton. Esta toma valores entre 0 e 1.
- b) A DQE (*Detective Quantum Efficiency*) é a razão entre o quadrado do SNR de saída ( $SNR_{out}$ ) e o quadrado do SNR de entrada ( $SNR_{in}$ ):  $DQE = \frac{SNR_{out}^2}{SNR_{in}^2}$ .
- c) O NEP (*Noise-equivalent power*, cujo termo português é potência equivalente de ruído) é uma medida da sensibilidade de um detetor. É o sinal radiométrico de entrada em watts que produz uma razão de sinal-ruído igual a 1. Tal como a sensibilidade radiante, este termo resulta da integração sobre os comprimentos de onda incidentes. Um pequeno NEP corresponde a um detetor mais sensível.
- d) Apesar da sensibilidade radiante de um detetor fornecer a medição de um sinal de saída do detetor para um dado sinal ótico de entrada, não dá informação sobre a sensibilidade do instrumento. A detetividade  $D$  (*detectivity*) é o inverso do NEP e as suas unidades são  $W^{-1}$ . Esta quantidade é muito útil quando se pretende comparar a sensibilidade de detetores diferentes. Contudo, esta não considera o efeito da área e da largura de banda de frequência. A detetividade é dada através da seguinte expressão:  $D = \frac{1}{NEP} = SNR / \Phi_{input}$ .
- e) Para incluir também os efeitos não considerados anteriormente, foi introduzido o conceito de detetividade específica. A detetividade específica ou normalizada  $D^*$  é a detetividade de um detetor com área igual a  $1 \text{ cm}^2$  e uma largura de banda de 1 Hz. Esta é representada através da seguinte equação:  $D^* = D \sqrt{A_d B}$ , onde  $A_d$  é a área do detetor e  $B$  a ENB<sup>10</sup>. As suas unidades são  $\text{cm.Hz}^{1/2}/W$ . Esta permite comparar detetores de diferentes materiais, áreas e ENB.

De entre os dois tipos de detetores referidos anteriormente, para este caso de estudo, o que se adequa mais é o tipo de detetores fotoelétricos, pois existem dispositivos de estado sólido com boa eficiência quântica para este tipo de fótons. Relativamente aos detetores térmicos, os detetores de estado sólido têm uma resposta mais rápida e não têm tempo morto de deteção.

De seguida, encontra-se uma descrição do funcionamento físico deste tipo de detetores bem como alguns exemplos.

### 5.1.1. Detetores Fotoelétricos

Os principais tipos de detetores fotoelétricos são os fotocondutores, os foto-emissivos e os fotovoltaicos. Neste tipo de detetores, os fótons incidentes interagem com os eletrões no material e alteram a sua distribuição de carga eletrónica. Esta perturbação na distribuição de carga gera uma corrente ou tensão que é possível medir através de um circuito eletrónico. Como a interação fóton-eletrão é “instantânea”, a resposta deste tipo de detetores é muito superior à dos detetores térmicos, como já tinha mencionado anteriormente.

---

<sup>10</sup> O termo em inglês é “*Effective noise bandwidth*” e é o equivalente a uma largura de banda de onda quadrada. Esta difere da largura de banda de 3 dB convencional. A ENB é indicada no espaço de frequências abaixo de frequências de  $10^{12}$  Hz.

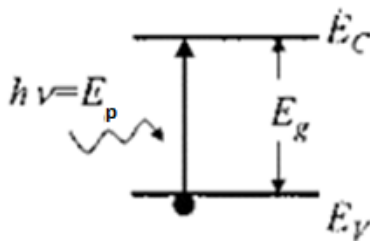


Figura 5.1 - Semicondutor intrínseco, onde um elétron da banda de valência ( $E_v$ ) absorve a energia de um fóton incidente ( $E_p$ ) e é excitado para a banda de condução ( $E_c$ ).

Os materiais usados neste tipo de detetores são tanto os semicondutores intrínsecos como os extrínsecos. Os primeiros são materiais com uma concentração de impurezas muito baixa e, portanto, quase puros. A maioria tem uma energia de hiato muito bem definida. Os fótons com energia inferior à energia de hiato não são absorvidos e são refletidos ou transmitidos. Para que um fóton seja absorvido é necessário que este tenha uma energia mínima e que de seguida excite um elétron da banda de valência para a banda de condução, de forma a que este esteja disponível para condução quando for aplicado um campo elétrico. Acima dum comprimento de onda específico para cada semicondutor os elétrons não terão energia suficiente para alcançar a banda de condução. Esse comprimento de onda designa-se comprimento de onda de corte e é representado pela seguinte equação:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad (5.1)$$

onde  $h$  é a constante de Planck,  $c$  a velocidade da luz no vácuo e  $E_g$  a energia de hiato em eletrões Volt (eV), isto é, a energia mínima requerida do fóton para que o elétron passe para a banda de condução. O excesso de energia, ou seja, o que resulta da diferença  $E_p - E_g$ , surge na forma de calor ( $E_p = hc/\lambda$  é a energia do fóton incidente). O mecanismo de excitação de elétrons neste tipo de semicondutores encontra-se retratado na Figura 5.1.

Por exemplo, o semicondutor InSb tem uma energia de hiato de 0.22 eV, o que corresponde a um comprimento de onda de 5.6  $\mu\text{m}$  [10]. Fótons com comprimentos de onda superiores passam através do material e não são detetados, ou seja, o InSb é transparente a radiação com comprimentos de onda superiores a 5.6  $\mu\text{m}$ . Fótons que tenham comprimentos de onda inferiores podem ser absorvidos e contribuem para a sensibilidade radiante.

Os semicondutores extrínsecos são os que contêm impurezas especialmente selecionadas de forma a alterarem as características da rede semicondutora. A impureza introduzida é designada de dopante. A combinação de semicondutores com diferentes tipos de dopagens faz emergir propriedades elétricas não observáveis quando separados que são, na maior parte dos casos, muito úteis no controlo de correntes elétricas. Os semicondutores anfitriões mais utilizados atualmente, isto é, aqueles que são dopados com as impurezas, são o silício (Si) e o germânio (Ge), ambos do grupo IV da tabela periódica. O germânio foi durante muitos anos o único disponível para comprimentos de onda superiores a 5  $\mu\text{m}$ . O silício é muito utilizado em detetores para aplicações no visível e nos infravermelhos próximos [11].

As impurezas destes semicondutores podem ser designadas dadoras ou aceitadoras. No primeiro caso, as impurezas são átomos que possuem mais elétrons de valência do que aqueles que são necessários para completar as ligações com os átomos anfitriões. Desta forma, no semicondutor extrínseco pode existir excesso de elétrons face ao número de lacunas ou buracos (cargas portadoras de sinal contrário ao dos elétrons) e o semicondutor é do tipo N. Os átomos dos dadores são do grupo V da tabela periódica e têm

cinco elétrons de valência. Apenas quatro são necessários para o caso do material semiconductor ser o silício ou o germânio. O quinto elétron restante está muito fracamente ligado ao átomo anfitrião. Este reside no nível dador a 0 K, mas, a uma temperatura mais elevada, pode ser excitado termicamente para a banda de condução.

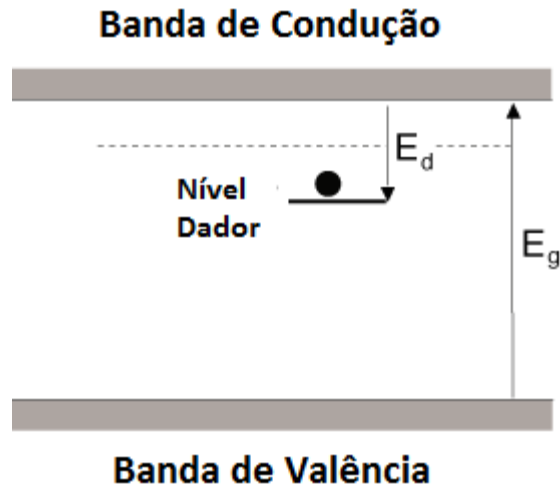


Figura 5.2 – Estrutura de bandas de um semiconductor extrínseco do tipo N.

As impurezas aceitadoras aceitam elétrons dos átomos do semiconductor e, neste caso, ocorre um excesso de buracos face ao número de elétrons, uma vez que parte destes em vez de se recombinarem com os buracos, são aceites pelas impurezas. Neste caso o semiconductor diz-se do tipo P. O propósito deste tipo de dopagem é criar abundância de lacunas. Os aceitadores são átomos do grupo III, o que leva a que uma ligação covalente fique incompleta, o que faz com que um dos átomos vizinhos lhe ceda um elétron para completar as quatro ligações. Desta forma, os dopantes criam lacunas. Quando o material é aquecido, os elétrons são excitados desde a banda de valência para o nível aceitador, deixando para trás um buraco para condução.

A dopagem máxima normalmente considerada para semicondutores extrínsecos é de cerca de  $6 \times 10^{17}$  átomos/cm<sup>3</sup> [11].

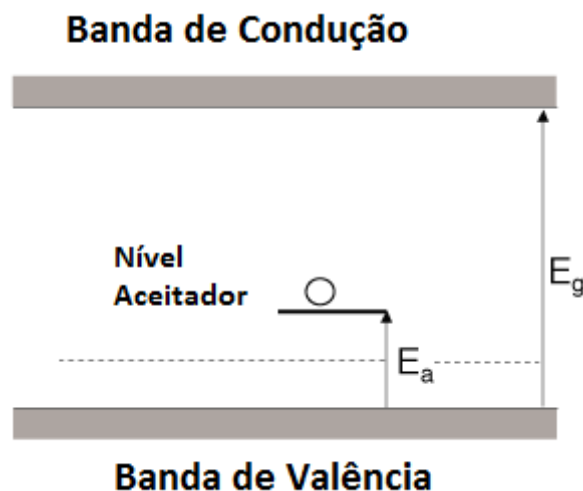


Figura 5.3 - Estrutura de bandas de um semiconductor extrínseco do tipo P.

O sinal de saída dos detetores fotoelétricos é designado foto-resposta. Esta depende da frequência ou comprimento de onda da luz incidente e diminui abruptamente quando o comprimento de onda da luz incidente se torna superior ao comprimento de onda crítico.

Como se irá verificar mais adiante, o detetor que se selecionou para o trabalho desenvolvido foi um fototubo. Este detetor é do tipo foto-emissivo. A escolha foi feita com base na sua sensibilidade para a gama de radiação VUV e segundo o que se encontrava disponível no mercado a um custo acessível.

Os fototubos não apresentam variações do sinal de saída apreciáveis, mesmo com oscilações da temperatura ambiente e oferecem uma grande área fotossensível.

Deste modo, de entre os tipos de detetores fotoelétricos referidos, irei apenas focar o funcionamento físico dos detetores foto-emissivos.

Dos outros tipos de detetores mencionados, sabe-se que os fotocondutores são mais utilizados para aplicações na gama do visível e do infravermelho, principalmente para além dos 5  $\mu\text{m}$  onde os detetores fotovoltaicos não operam [11].

#### 5.1.1.1. Detetores Foto-Emissivos: Princípios Básicos

O princípio básico de funcionamento dos detetores foto-emissivos é a fotoemissão ou efeito fotoelétrico. Na fotoemissão, os eletrões recebem energia suficiente de um fóton incidente para escaparem fisicamente a um material fotossensível apelidado foto-cátodo. Em primeiro lugar, neste efeito, é absorvido um fóton, resultando um eletrão. Este último, move-se para a interface de vácuo e escapa acima da superfície de barreira para o vácuo. Nos dispositivos práticos, o eletrão é atraído e recolhido por um ânodo carregado positivamente.

A energia mínima necessária, em eV, para remover um eletrão da sua ligação atómica (função trabalho) é dada por:

$$\phi = hf_0 \quad (5.2)$$

em que  $f_0$  é a frequência mínima para o efeito fotoelétrico ocorrer e  $h$  a constante de Planck. Se a energia do fóton incidente ( $hf$ ) não for superior à função trabalho, não resultará nenhum eletrão livre.

Os semicondutores e os metais são os materiais mais utilizados para os foto-cátodos. Como se verá nas especificações do detetor que se irá utilizar no sistema de simulação, o seu foto-cátodo é feito de um material semiconductor.

Os foto-cátodos metálicos são utilizados no ultravioleta, mas a sua eficiência quântica é muito baixa ( $\eta \approx 0,001$ ). Uma elevada eficiência quântica e a operação numa vasta gama de comprimentos de onda podem ser obtidas através de foto-cátodos semicondutores. Esta elevada eficiência quântica resulta das baixas perdas de reflexão. Conseguem-se valores acima de 0.3 para comprimentos de onda longos como 800 nm [11].

Nos semicondutores, o fóton deve transmitir energia suficiente para um eletrão da banda de valência atingir a banda de condução e ter ainda energia suficiente para escapar do material para o vácuo circundante. A afinidade de eletrões  $E_a$  é dada como a diferença de energia entre a parte inferior da banda de condução e o nível do vácuo. A energia necessária para elevar um eletrão da banda de valência para a banda de condução designa-se de energia do hiato  $E_g$ , como já foi referido. A soma destas energias define a função

trabalho para os semicondutores,  $\phi = E_g + E_a$  (Figura 5.4). Esta é a energia mínima necessária para escapar à barreira de potencial.

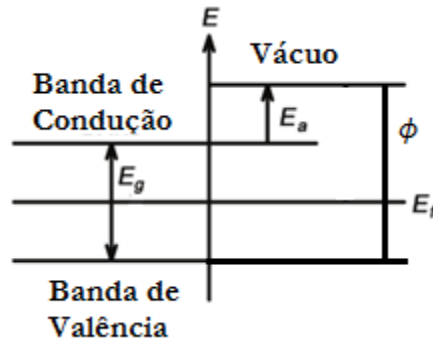


Figura 5.4 – Fotoemissão em semicondutores.

#### 5.1.1.1.1. Corrente Escura

Nos foto-cátodos, a corrente escura é um fator limitativo e é indistinguível da foto-corrente. Esta corrente é observada no detector mesmo quando não há incidência de radiação. Esta é consequência da emissão térmica pelo cátodo e a intensidade desta corrente aumenta com a temperatura (Figura 5.5) e com a superfície do cátodo. A densidade de corrente escura é, então, caracterizada através da equação de Richardson:

$$J = CT^2 e^{\left(-\frac{\phi}{kT}\right)} \quad (5.3)$$

em que J é a densidade da corrente em A/m<sup>2</sup>, T a temperatura, C uma constante (aproximadamente  $1,2 \times 10^6$ ), k a constante de Boltzmann e  $\phi$  a função trabalho.

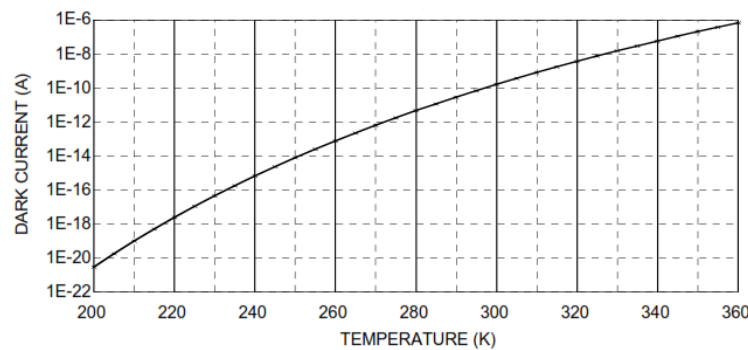


Figura 5.5 - Equação de Richardson que expressa a corrente escura em função da temperatura.

#### 5.1.1.1.2. Tipos de Detetores Foto-Emissivos

Existem dois tipos de detetores foto-emissivos: os fototubos e os MCPs (*Microchannel Plates*).

Os fototubos são tubos bipolares baseados no efeito foto-emissivo que possuem dois elétrodos num invólucro de vidro. Um elétrodo, o cátodo, emite eletrões quando a sua superfície sensível é exposta a luz ou a outra energia radiante. Estes eletrões são atraídos para o segundo elétrodo, o ânodo, uma vez que este é operado a um potencial positivo. O número de eletrões emitidos pelo cátodo depende do comprimento de onda e da quantidade de energia radiante que sobre ele incide. Os fototubos providenciam, deste modo, uma corrente elétrica cuja magnitude pode ser controlada pela luz ou outra energia radiante.

Como vimos anteriormente, a sensibilidade de um fototubo é definida como o quociente entre a corrente que atravessa o detetor e o fluxo radiante recebido pelo cátodo. Esta depende da cor da luz ou da distribuição espectral do fluxo radiante usado para excitar o tubo.

A presença no fototubo de uma pequena quantidade de um gás inerte, como o Néon ou o Árgon, aumenta a sua sensibilidade. Estes fototubos possuem uma sensibilidade mais elevada do que os fototubos de vácuo e são preferencialmente utilizados em aplicações que envolvem reprodução de som. Por outro lado, os fototubos de vácuo possuem uma resistência interna superior, têm uma sensibilidade mais constante durante o seu tempo de vida e são menos suscetíveis de serem danificados pelo funcionamento acidental com altas tensões ou correntes. Estes são mais utilizados em aplicações de medições de grandezas radiométricas [12].

O facto de o gás aumentar a sensibilidade do fototubo deve-se aos eletrões que se movem do cátodo para o ânodo e que colidem com os átomos do gás formando uma avalanche. A corrente total de um fototubo de gás pode ser várias vezes superior à corrente do fototubo de vácuo correspondente quando operados com a mesma tensão no ânodo e com a mesma luz.

O material do cátodo determina a sensibilidade espectral do detetor. Este pode ser feito de diferentes materiais, com diferentes propriedades. Tipicamente, utilizam-se os materiais que têm uma função trabalho baixa. Na tabela seguinte estão alguns materiais usados em cátodos.

*Tabela 5-2 – Materiais utilizados em cátodos de detetores foto-emissivos.*

<b>Material do Cátodo</b>	<b>Observações</b>
<b>Ag-O-Cs</b>	Sensível entre 300-1200 nm. Elevada corrente escura.
<b>GaAs:Cs</b>	Sensível entre 300-850 nm.
<b>InGaAs:Cs</b>	Maior sensibilidade no infravermelho do que o GaAs:Cs. Entre os 900 e os 1000 nm tem maior razão sinal-ruído do que o Ag-O-Cs.
<b>Sb-Cs</b>	Sensível desde o ultravioleta até ao visível. É muito usado.
<b>Solar-Blind (Cs-Te, Cs-I)</b>	Sensível a VUV e UV. É insensível ao visível e ao infravermelho. O cutoff do Cs-Te é aos 320 nm e do Cs-I é aos 200 nm.

Para uma calibração constante de dispositivos de alta precisão com uso de um fototubo de vácuo, é essencial que este seja operado com uma tensão no ânodo igual ou inferior a 20 V [12].

Aquando da escolha do detetor, teve-se em consideração o material do cátodo e verificou-se que a melhor opção seria escolher um *Solar-Blind*, dado que estes são sensíveis precisamente na gama de radiação que se pretende para este trabalho, o VUV, e são insensíveis na gama dos infravermelhos e do visível. Como se verá mais adiante, o detetor escolhido é um *Solar Blind Phototube* cujo material do cátodo é Cs-Te. Este detetor é de vácuo, o que também foi uma consideração a ter, pois esta característica, como já se verificou anteriormente, garante que este não é tão facilmente danificado quando a sua operação não é a correta, relativamente aos de gás.

Existe, ainda, um tipo de fototubo que é extremamente sensível devido à sua amplificação – o fotomultiplicador. Neste, um eletrão do cátodo é acelerado e colide com um dínodo, um elétrodo que produz eletrões secundários. Este processo continua por 9 ou mais estágios, o que leva à produção de uma “chuva”



de elétrons que é recolhida pelo ânodo. Os fotomultiplicadores são usados em diferentes áreas incluindo contagem de fótons, espectrorradiometria e em sistemas de imagem [11].

O fototubo utilizado neste trabalho é descrito mais detalhadamente na Secção 7.2.2.

Os MCPs são discos construídos a partir de milhões de microcanais, pequenos tubos de vidro cujos diâmetros podem variar entre 10 a 40  $\mu\text{m}$ . Tipicamente, o tamanho dos discos destes sensores varia entre os 18 e os 75 mm de diâmetro e entre 0.5 e 1 mm de comprimento. São muito utilizados em sistemas de intensificação de imagem<sup>11</sup>, onde cada canal do disco contribui com um pixel na imagem resultante. Em aplicações que usam as gamas de UV, visível e raios x são, também, muito úteis.

O princípio de funcionamento destes detetores é semelhante ao dos fotomultiplicadores. Nestes, os dínodos são substituídos pelos microcanais. Um elétron primário do cátodo embate num microcanal e causa emissão secundária, este processo continua até se atingir um elevado número de elétrons acelerados e que vão em direção ao eléctrodo positivo na outra extremidade do tubo. A superfície interior dos microcanais é revestida com um material de alta resistividade o que garante boas características para que ocorra emissão secundária.

---

<sup>11</sup> Sistemas desenvolvidos para aumentar a intensidade da luz num sistema ótico de forma a que este possa ser utilizado em condições de pouca luz, para facilitar a imagem visual de processos de baixa luminosidade, como fluorescência de materiais em raios-x ou raios gama, ou para conversão de fontes de luz não visíveis, como infravermelho próximo para visível.

## 6. Fontes de UV/VUV

Existem várias formas de classificar fontes de radiação ótica. As fontes ativas emitem radiação devido a transições atômicas – fontes luminescentes – ou devido à sua temperatura – fontes térmicas. As fontes passivas também podem ser classificadas como térmicas e luminescentes, dependendo do processo que gera a radiação. Estas refletem a radiação proveniente de fontes ativas ou de outras fontes passivas. Simuladores de radiação de corpo negro, lâmpadas de filamento de tungstênio, gases, o Sol e a Lua são alguns exemplos de fontes térmicas. Já as lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de sódio, os lasers e LEDs são exemplos de fontes luminescentes. Algumas fontes podem ainda ser uma combinação de mecanismos térmicos e luminescentes e outras podem ser consideradas ativas e passivas simultaneamente. Ainda há autores que fazem distinção entre as fontes artificiais, isto é, feitas pelo Homem, e fontes naturais. O Sol, a Terra e as estrelas são fontes naturais, enquanto as lâmpadas são artificiais.

As fontes também se podem distinguir quando à forma como emitem radiação, ou seja, existem fontes contínuas que possuem uma radiância espectral que varia ligeiramente com o comprimento de onda, o que é típico de fontes térmicas e fontes que emitem em regiões espectrais bem definidas. Outra forma de diferenciar as fontes é através do seu grau de coerência temporal e/ou espacial.

Tendo em conta que para o sistema de simulação em questão neste trabalho é necessária uma fonte de radiação VUV, irei apenas focar no estudo do tipo de fonte de VUV/UV selecionado para o desenvolvimento do sistema fazendo, ainda, referência a outros tipos que também existem e podem ser aplicadas na radiometria de UV.

A radiação ultravioleta é produzida principalmente através de lâmpadas de descarga de gás e de díodos emissores de luz (LEDs). As lâmpadas de descarga de gás são principalmente lâmpadas de mercúrio de baixa e média pressão, lâmpadas de deutério, lâmpadas de alta pressão dopadas e lâmpadas de gás raro de alta pressão. Estas lâmpadas diferem quanto à sua dimensão, gama espectral, potência, eficiência radiante e tempo de vida.

Hoje em dia, é através de descarga de gás que praticamente todas as lâmpadas de UV geram radiação. Estas são produzidas com comprimentos que variam entre poucos centímetros e quatro metros, potência espectral entre os 0.1 W/cm e os 400 W/cm, emissão espectral desde o VUV até UVA, eficiências radiantes até 60% e com tempos de vida que variam desde as 100 horas até muitas milhares de horas [13].

Numa descarga de gás, os eletrões são acelerados através de um campo elétrico de 1 a 100 V/cm. Estes transferem energia cinética para as partículas do gás através de colisões que levam à sua excitação. Muitas destas partículas excitadas tendem a retomar, por emissão espontânea de radiação, os estados de menor energia. Depois de alguma reabsorção, a radiação emitida internamente vai passar através do invólucro da lâmpada para o exterior.

Das lâmpadas de descarga de gás mencionadas, as lâmpadas de deutério são as ideais para espectroscopia na região do ultravioleta. Estas lâmpadas usam um filamento de tungstênio e um ânodo colocados em lados opostos de uma estrutura de níquel desenhada de forma a produzir o melhor espectro de saída. O filamento destas lâmpadas não é a fonte. Em vez dele, é criado um arco desde o filamento até ao ânodo. O filamento precisa de estar muito quente para que lâmpada se acenda e para tal é pré-aquecido por aproximadamente 20 segundos. O tempo de vida destas lâmpadas é de aproximadamente 2000 horas. A maioria dos fabricantes garante esse tempo, contudo as lâmpadas mais recentes têm ainda um bom desempenho nas 5000 horas ou mais de vida.

O arco excita o deutério molecular ( $D_2$ ), contido na lâmpada, para um nível de energia superior. Ao regressar ao estado inicial, o deutério emite luz e este ciclo contínuo é a origem da radiação ultravioleta contínua. Neste processo de emissão molecular, é o decaimento radioativo de estados excitados na molécula de deutério que causa a emissão de luz.

A lâmpada de deutério emite radiação desde os 112 nm até aos 900 nm, contudo o seu espectro contínuo situa-se entre os 180 nm e os 370 nm e lâmpadas deste tipo com potência superior a 300 W são muito úteis para aplicações no UV profundo.

São usados invólucros de quartzo fundido, vidro de UV ou Fluoreto de Magnésio neste tipo de lâmpada. Não podem ser usados invólucros de vidro normal devido a estas lâmpadas operarem a temperatura muito elevadas e devido à forte absorção de UV nas janelas de saída.

A fonte de UV utilizada neste trabalho é descrita mais detalhadamente na Secção 7.2.1.

# 7. Sistema de Simulação Espacial do CENTRA-SIM – Descrição Geral

Neste capítulo, é introduzido o sistema de simulação que foi idealizado e desenvolvido, no grupo CENTRA-SIM e se encontra localizado na FCUL. Este divide-se em dois subsistemas: o sistema de simulação de VUV orbital, que simula o ambiente espacial VUV (Vacuum UV), de forma acelerada (múltiplo do fluxo espacial), ao qual uma nave está sujeita na *LOW Earth Orbit* (LEO), e o sistema de vácuo térmico, que simula os ciclos térmicos experimentados por um veículo nessa mesma órbita.

O subsistema de simulação de VUV será explicado com mais detalhe, visto ter sido esse o que foi desenvolvido no âmbito desta tese. De seguida, vou fazer uma pequena descrição do subsistema térmico para que se entenda a junção dos dois no sistema total de simulação espacial.

Estes dois sistemas atuam sobre uma base de alumínio (porta-amstras), onde estão colocadas uma série de amostras. As amostras dentro do sistema total são expostas à radiação VUV e aos ciclos térmicos de forma a que se possa observar a sua degradação e a formação de detritos provenientes das mesmas. Este estudo da degradação, que também compete ao grupo CENTRA-SIM, foi realizado com o auxílio de observação ao microscópio e SEM (*Scanning Electron Microscope*).

O conjunto de amostras é constituído por 3 amostras de MLI<sup>12</sup> (*Multi-layer insulation*) e 6 amostras de tintas usadas nas superfícies exteriores de naves espaciais.

## 7.1. SUBSISTEMA DE CICLOS TÉRMICOS

Este subsistema consiste, de uma forma geral, num criostato onde se inclui uma base de alumínio, onde estarão colocadas as amostras que serão testadas, num *cryocooler*<sup>13</sup> de Hélio (fonte fria), para extrair o calor da base de alumínio, e seis resistências de calor (fonte quente) com uma potência cumulativa de 100 W.

Para realizar os ciclos térmicos é necessário aquecer e de seguida arrefecer a base de alumínio. Esta variação térmica foi implementada com um design inovador.

A comutação térmica em vácuo é alcançada com a utilização de três pistões pneumáticos conectados por “bellows” e ligados à fonte fria. Quando desconectados, as resistências são ligadas para aquecer o sistema até à temperatura máxima. Para realizar um arrefecimento, as resistências são desligadas e os pneumáticos são acionados. A ligação térmica entre o *cryocooler* e os pistões é feita com seis tranças de cobre.

Existem vários sensores de temperatura (PT100), dos quais dois são particularmente importantes neste subsistema. Um deles é colocado no *cold finger*, para monitorizar a temperatura e assegurar o correto funcionamento do *cryocooler*. O outro é colocado no centro do porta-amstras e é usado como referência para o controlo do sistema de ciclos térmicos. Os outros sensores de temperatura servem para monitorizar as conduções térmicas e como segurança caso o sistema falhe durante os testes.

O controlo do sistema é feito através do programa LabView. A aplicação desenvolvida neste programa permite fazer uma série de operações do sistema. Cada ciclo inclui quatro estágios: aquecimento, patamar a alta temperatura, arrefecimento, patamar a baixa temperatura. Nas fases de patamar da temperatura, a temperatura do porta-amstras é controlada através de controlador PID.

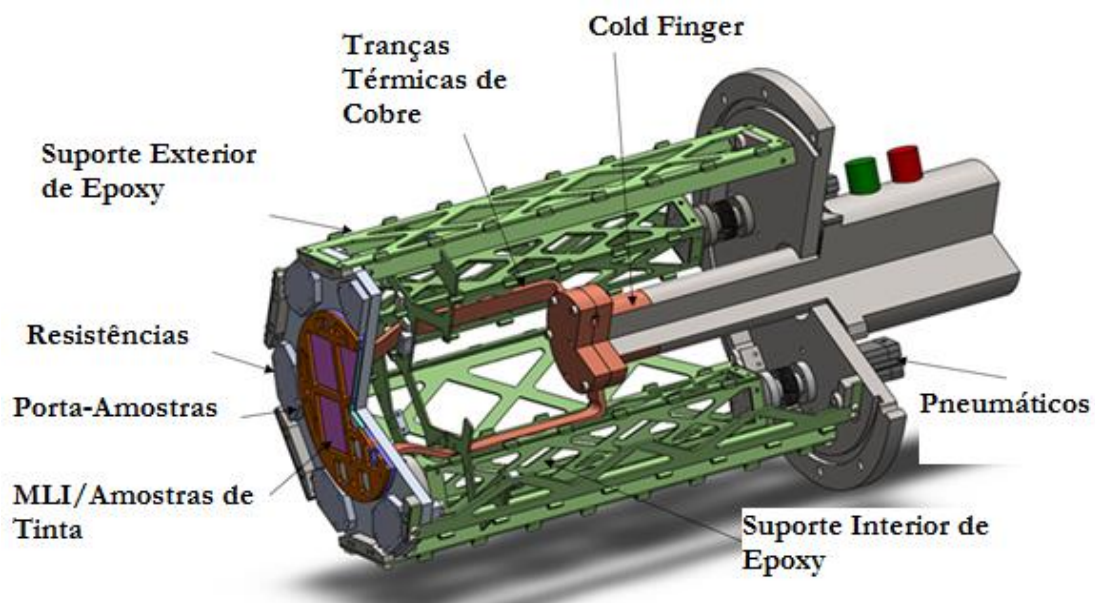
---

<sup>12</sup> Material de isolamento térmico composto por várias camadas de folhas finas e é frequentemente usado em naves espaciais. É um dos principais itens do design térmico de naves espaciais, destinado principalmente a reduzir a perda de calor por radiação térmica.

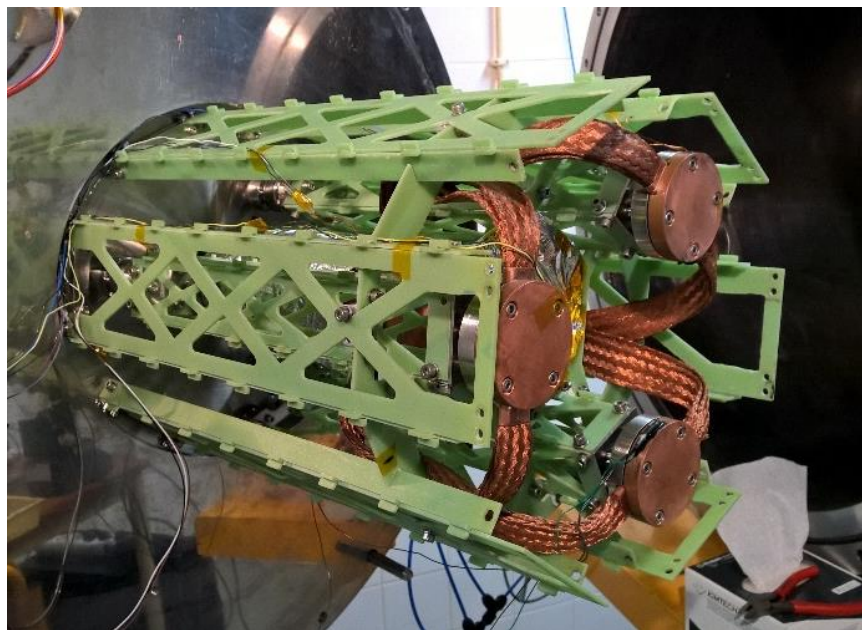
<sup>13</sup> Instrumento usado para arrefecer, em diversas aplicações, a temperaturas criogénicas.

Na figura seguinte encontra-se o desenho deste sistema com os respetivos componentes identificados.

Todo este sistema encontra-se dentro de uma câmara de vácuo, onde também foi adicionado o sistema de VUV que irei descrever a seguir.



*Figura 7.1 - Design final do subsistema de ciclos térmicos em vácuo.*



*Figura 7.2 – Sistema sem a base de alumínio. Pode-se observar a interface térmica de cobre dos pistões.*

## 7.2. SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE VUV ORBITAL

Em primeiro lugar, definiu-se uma arquitetura conceitual do sistema VUV. Este sistema encarrega-se de gerar radiação VUV (100 nm a 200 nm), de forma a irradiar uniformemente um porta-amstras com uma irradiância superior à irradiância VUV do Sol. O porta-amstras é o referido anteriormente no subsistema de ciclos térmicos. Este subsistema de VUV foi concebido tendo em conta o sistema já desenvolvido para o subsistema de ciclos térmicos. Na Figura 7.3, está representada a arquitetura do sistema.

O sistema é composto por uma lâmpada de VUV (2), pela alimentação da lâmpada (1), por uma interface de ligação entre a lâmpada e a câmara de vácuo (3), por uma câmara de vácuo (4), que faz parte do subsistema descrito anteriormente, um porta-amstras (5) e um detetor (6). A zona de interface (3) permite que o vácuo seja mantido na câmara, mesmo que se queira retirar a lâmpada durante os testes. Quando tal acontece, para voltar a colocar a lâmpada e para que a zona entre a lâmpada e o início da câmara de vácuo esteja também em vácuo, recorrer-se-á a uma bomba de vácuo adicional que está ligada a uma peça desta zona de ligação, permitindo obter vácuo.

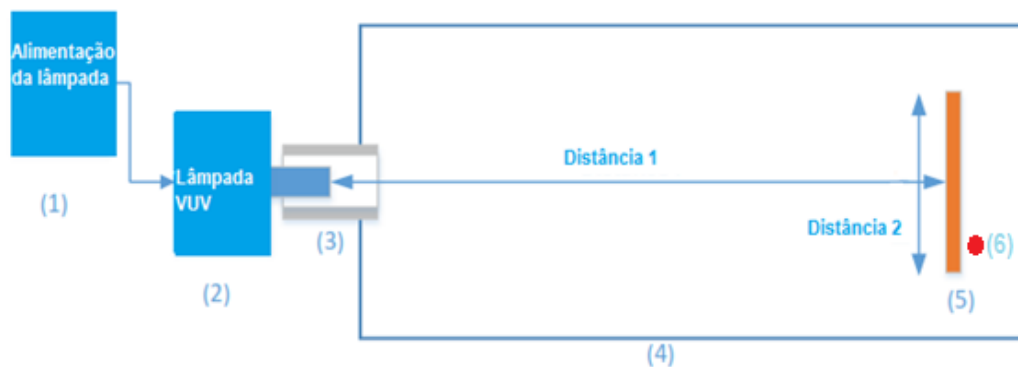


Figura 7.3 - Arquitetura do sistema VUV.

A distância 1 da figura da arquitetura do sistema representa a distância entre a lâmpada de VUV e o porta-amstras, e a distância 2 o diâmetro do porta-amstras. Na Figura 7.4, pode observar-se o desenho mecânico realizado em *SolidWorks* do porta-amstras que se utilizou. Este é feito de alumínio, tem um diâmetro de 160 mm e é constituído por 3 espaços maiores (49mmx49mm), para amostras de MLI, e 6 espaços (22mmx22mm) para amostras de tintas.

Um dos pontos essenciais deste sistema é a localização do detetor. Como o porta-amstras já estava definido para o subsistema de ciclos térmicos, não foi possível colocar o detetor atrás deste e no eixo ótico da lâmpada. Desta forma, o detetor ficou localizado a 6.89 cm do eixo ótico da lâmpada imediatamente atrás do porta-amstras. Na Figura 7.4, está assinalado a amarelo o orifício que surge na direção da posição onde se encontra o detetor.

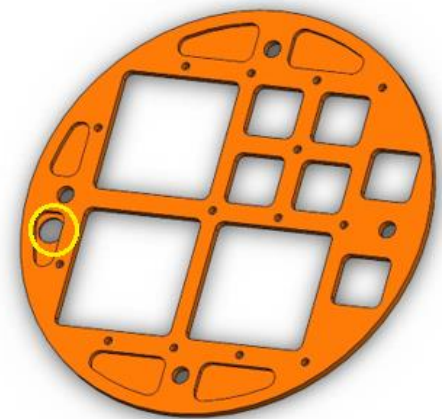


Figura 7.4 – Porta-amstras. A amarelo encontra-se assinalado o orifício onde, imediatamente atrás, foi colocado o detetor.

### 7.2.1. Lâmpada de VUV: Especificações Técnicas

A lâmpada de VUV selecionada para este sistema foi a lâmpada de deutério L11798 da *Hamamatsu*, que possui uma janela de Fluoreto de Magnésio ( $\text{MgF}_2$ ). Esta providencia um espectro contínuo entre os 115 nm e os 400 nm. Este tipo de lâmpada consegue fornecer a irradiância do sol para comprimentos de onda de 160 nm e abaixo, e, então, facilitam os testes acelerados em laboratório. No entanto, a comprimentos de onda acima de aproximadamente 160 nm, o espectro da lâmpada de deutério mostra uma diminuição da irradiância com o aumento do comprimento de onda. O espectro AM0 da irradiância do sol, por sua vez, continua a aumentar de intensidade para comprimentos de onda superiores a 160 nm. Apesar do facto de a forma espectral da lâmpada não coincidir com a do sol, o benefício deste tipo de lâmpada relativamente a fontes de VUV de comprimento de onda único é a ampla saída espectral.

As suas especificações estão representadas nas figuras seguintes.

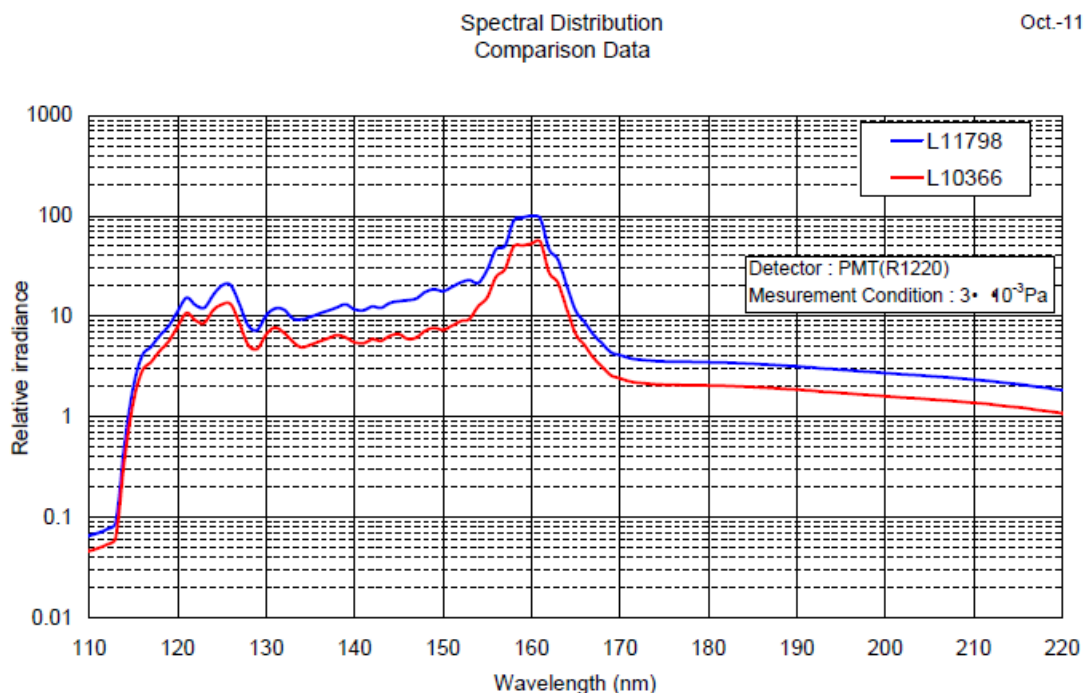


Figura 7.5 – Gráfico da Irradiância relativa das lâmpadas L11798 e L10366 em função do comprimento de onda. Este foi fornecido pelo fabricante e não se encontra em nenhuma datasheet das referências.

É de notar que inicialmente a lâmpada do sistema era a L10366 da *Hamamatsu*, contudo, devido a problemas técnicos, esta lâmpada acabou por ficar danificada e substitui-se pela lâmpada L11798. Foi fornecido este espectro relativo e o espectro da irradiância em função do comprimento de onda da primeira lâmpada. Mais adiante, se verá como foi abordado este constrangimento nos cálculos radiométricos.

Na figura seguinte, encontra-se o espectro da lâmpada L10336.

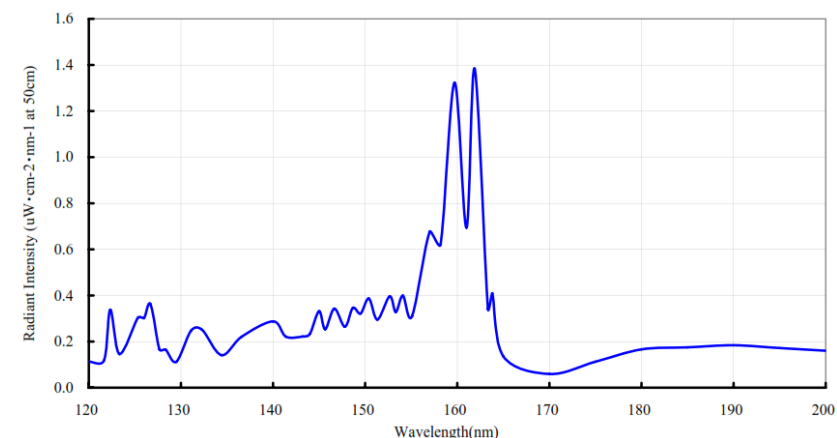


Figura 7.6 – Espectro da Irradiância da lâmpada L10336 a 50 cm. Este foi fornecido pelo fabricante e não se encontra em nenhuma datasheet das referências.

Segundo as especificações técnicas, o ângulo de emissão máximo da lâmpada L11798 é de  $10^\circ$ . Para iluminar totalmente o porta-amostras de 160 mm de diâmetro, a lâmpada deve estar a uma distância mínima de 914,4 mm do mesmo (caso esteja a uma distância inferior, o porta-amostras deixa de estar completamente iluminado). Na Figura seguinte pode observar-se o esquema que permite chegar a este valor de distância.

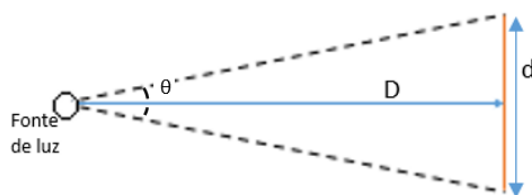


Figura 7.7 – Esquema para calcular a distância da fonte ao porta-amostras de forma a este ficar totalmente iluminado.

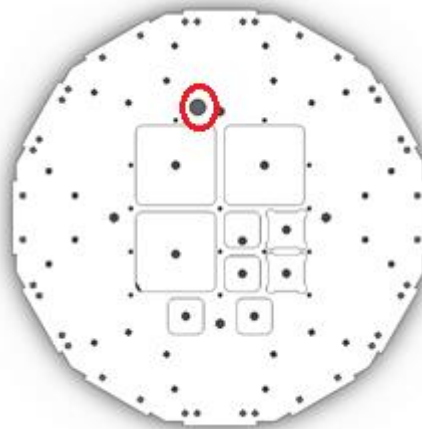
Para calcular a distância D da Figura 7.7, recorreu-se à seguinte expressão:

$$D = \frac{d/2}{\tan(\theta/2)} \quad (7.1)$$

em que  $\theta$  é o ângulo de emissão da lâmpada (fonte de luz).



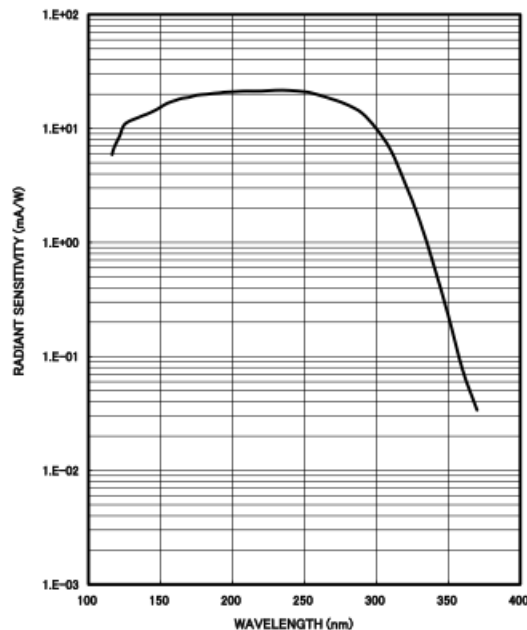
Por otimização do subsistema de ciclos térmicos, teve de se modificar o porta-amostras, para reduzir a massa que era submetida a ciclos térmicos e otimizar os tempos de arrefecimento e aquecimento. A solução foi fundir o porta-amostras na base de alumínio e para além disso foi reduzida a espessura desta base. Na figura pode-se observar, então, o porta-amostras final do sistema de simulação.



*Figura 7.8 - Porta-amostras final. Assinalado a vermelho está o orifício de passagem de luz para o detetor que se encontra imediatamente atrás deste.*

### 7.2.2. Fototubo: Especificações Técnicas

O detetor escolhido para este sistema de simulação de VUV foi o fototubo ou célula fotoelétrica R6800U-21 (*Solar Blind Phototube*) da *Hamamatsu*, que é um tipo de detetor foto-emissivo já estudado no Capítulo 5. Tem este então a função de gerar uma corrente, que será coletada e convertida numa tensão, consoante a radiação que o irradia e que é emitida pela lâmpada de VUV. De seguida, encontram-se as especificações do detetor selecionado.



*Figura 7.9 – Especificações técnicas do detetor: gráfico da Sensibilidade Radiante em função do comprimento de onda.*

Este detetor possui um foto-cátodo de Cs-Te. Este material é muito sensível ao VUV mas não à luz com comprimentos de onda superiores a 320 nm, incluindo a luz visível, como já foi estudado anteriormente.

Juntamente com este detector, também se adquiriu um *socket* para o mesmo. Na Figura 7.11, encontra-se o seu desenho técnico.

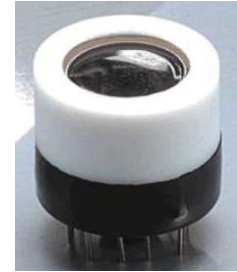
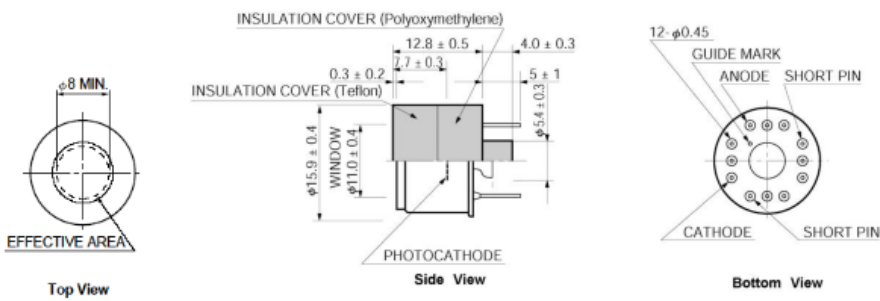


Figura 7.10 – Especificações técnicas do detector: dimensões do detector e fotografia do detector. [14]

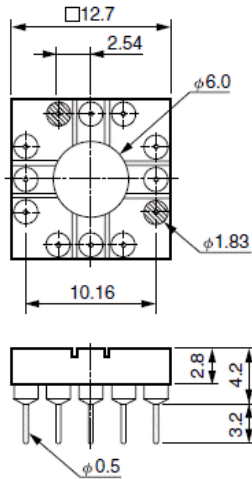


Figura 7.11 -Socket do detector. Este desenho técnico foi fornecido pelo fabricante e não se encontra em nenhuma datasheet das referências.

### 7.2.2.1. Desenho e Construção da Estrutura de Apoio ao Detetor

De forma a garantir a imobilidade e a estabilidade do detetor na sua posição atrás do porta-amostras e dentro da câmara de vácuo, foi desenhada e construída uma estrutura para este. Nas Figuras 7.12 e 7.13, podem observar-se os desenhos em *SolidWorks* da mesma. As peças desta estrutura foram executadas numa máquina CNC do Departamento de Física (*Computer Numeric Control*) (Figura 7.20).

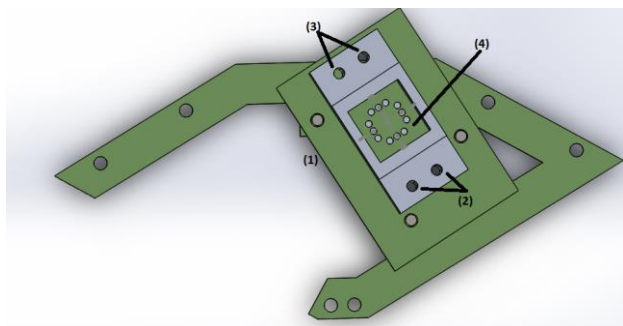


Figura 7.12 - Estrutura para o detetor vista de cima. (1) Peça em epóxi; (2) e (3) Orifícios das peças de alumínio onde entram parafusos; (4) Orifícios que servem de encaixe para o socket do detetor.

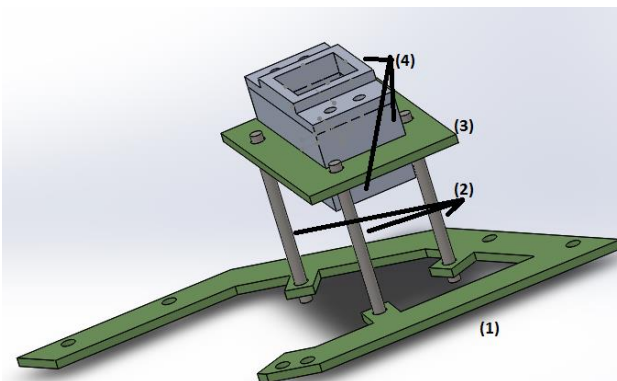


Figura 7.13 - Estrutura para o detetor. (1) Peça em epóxi que se adapta a uma peça de epóxi do suporte interior de epóxi (sistema de ciclos térmicos) e que se encontra atrás do porta-amostras; (2) Varões roscados; (3) Peça em epóxi; (4) Peças em Alumínio.

Nos orifícios da peça de epóxi, assinalados como (4) na Figura 7.12, é encaixado o *socket* do detetor, cujos pinos são soldados a uma pequena *pcb* que se encontra mesmo por baixo da peça de epóxi e dentro da última peça de alumínio, assinalada como (4) na Figura 7.13. A estrutura de epóxi incorpora um dos constrangimentos importantes para o projeto deste sistema que foi o isolamento térmico do detetor, pois, enquanto a estrutura de suporte vai ser arrefecida a 120 K, o detetor deve funcionar a temperaturas superiores a -80 °C. Desta forma, garante-se que o *socket* e, consequentemente o detetor, fiquem fixos a esta estrutura. Os pinos do *socket*, correspondentes ao ânodo e ao cátodo do detetor, são soldados aos dois fios correspondentes do circuito de aquisição, que será estudado mais adiante. Este circuito encontra-se, por sua vez, fixo à flange no interior da câmara de vácuo, como se observa na Figura 7.14.

Os varões roscados, que podem ser observados na figura 7.13, permitem ajustar a posição do detetor caso seja necessário aproximá-lo ou não da face inferior do porta-amostras.

Na Figura 7.18, pode ver-se a estrutura já montada no sistema total. Depois de colocado o detetor fixo nesta estrutura (Figura 7.17), mediu-se a sua posição relativamente à lâmpada:

- A distância entre a lâmpada e o plano onde se encontra a janela do detetor é de 91.65 cm;
- O detetor encontra-se desviado do eixo ótico da lâmpada de 6.89 cm.

É de notar que a distância entre a fonte e o plano do detetor é definida como a distância entre o centro do corpo da lâmpada, onde a descarga é iniciada, e o plano do detetor onde se situa a superfície do mesmo.

As peças de alumínio da estrutura permitem que o detetor, durante os testes, tenha uma temperatura diferente da definida pela radiação que provém do subsistema de ciclos térmicos. Nos parafusos destas peças ainda foram colocadas duas anilhas que tinham, cada uma, um cabo de cobre soldado cuja outra extremidade se encontra em contacto com a flange da câmara. Estes cabos de cobre constituem uma ancoragem térmica e foram colocados para evitar que o detetor fosse exposto a temperaturas extremas, devido aos ciclos de temperatura que decorrem durante os testes, quando o outro subsistema também está em funcionamento. Da Figura 7.16, que demonstra a variação da temperatura das peças de alumínio durante os ciclos de

temperatura do outro subsistema incluído nesta câmara, pode concluir-se que a temperatura das mesmas não excede os 20 °C nem é menor do que -55 °C e, portanto, o detetor, quando colocado nesta estrutura e submetido aos ciclos de temperatura, não corre o risco de estar a funcionar fora da sua gama de temperaturas de operação ([-80, 50] °C).

Para poder proceder a este estudo de temperatura utilizou-se o sensor de temperatura LM335 fixado com *stycast* numa das peças de alumínio, como se observa na Figura 7.15. Deste sensor saem dois fios para fora da câmara: um para a massa e outra para a alimentação do mesmo. Através do circuito representado na Figura 7.19 e de um conversor analógico-digital, é possível obter os valores do gráfico da Figura 7.16. No programa *Labview*, o sinal de saída é lido em tensão ( $V_{out}$ ) e este é convertido em Temperatura em °C, através da seguinte equação:

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{V_{out}}{0.010} - 273,15 \quad (7.2)$$

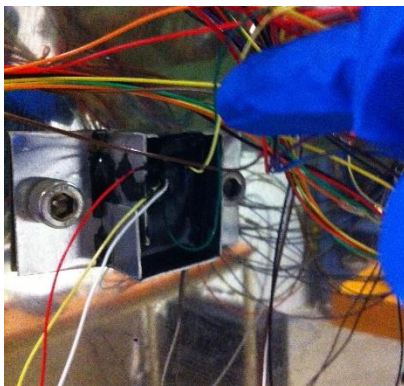


Figura 7.14 - Caixa de alumínio que contém o circuito de aquisição em stycast fixa na flange da câmara de vácuo.

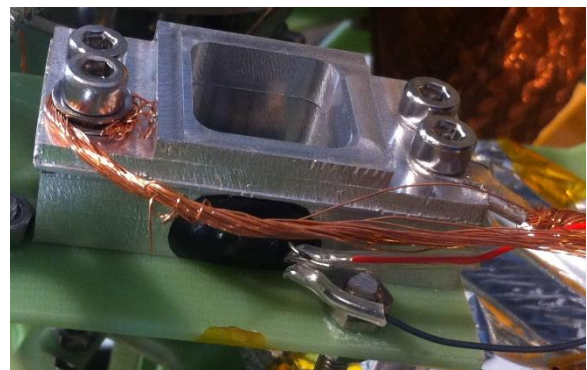


Figura 7.15 - Sensor de Temperatura LM335 fixo com stycast numa das peças de alumínio da estrutura para o detetor.

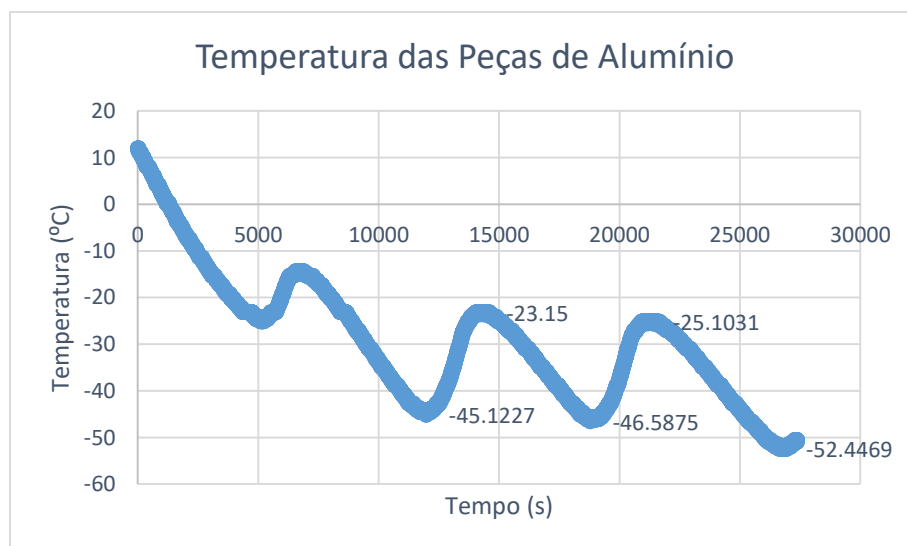


Figura 7.16 - Temperatura das peças de alumínio em função do tempo.



Figura 7.20 - Execução das peças da estrutura na CNC.

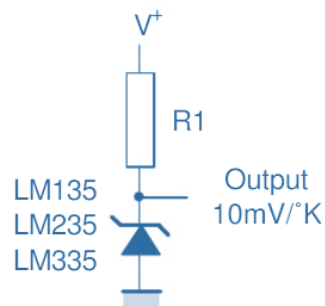


Figura 7.19 - Circuito do sensor de temperatura LM335. Onde R1 é 1 kΩ e V+ 5V.



Figura 7.17 - Estrutura montada no sistema final e o detetor de VUV colocado no socket.



Figura 7.18 - (1)Estrutura para o detetor montada no sistema total; (2) Socket do detetor de VUV.

### 7.3. PROJETO FINAL DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO ESPACIAL DO CENTRA-SIM

Na Figura 7.23, pode observar-se o desenho final do sistema feito em *SolidWorks*. A peça laranja que se encontra na imagem, por cima das amostras, é uma máscara em alumínio que fixa as amostras ao porta-amostras, de forma a que nenhuma caia durante os testes.

A interface entre a câmara de vácuo e a lâmpada, nas Figuras 7.22 e 7.21, é constituída pelas peças que passo a enumerar:

- peça 1: apresenta um pequeno orifício dum dos seus lados, local onde está colocada uma válvula que, por sua vez, se encontra ligada a um sistema de bombeamento para produzir vácuo;



- peça 2: consiste noutra válvula;
- peça 3: obteve-se em simultâneo com a lâmpada de VUV e que tem como função adaptar a lâmpada a qualquer sistema de vácuo.

Sempre que é necessário retirar a lâmpada sem que o vácuo da câmara seja afetado, a válvula (peça 2) é fechada. Quando se quer colocar a lâmpada de novo, basta abrir a válvula que está ligada à peça 1 e, através do sistema de bombeamento, produzir vácuo nesta zona de ligação. Quando se atinge o vácuo necessário, isto é, da ordem dos  $10^{-3}$ , essa válvula é fechada e a outra válvula (peça 2) aberta. A razão pela qual é necessária a execução deste processo, regularmente, irá ser explicada mais adiante.

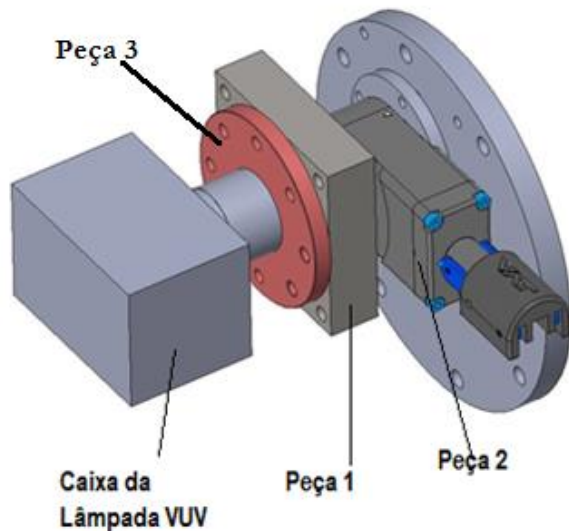


Figura 7.21 - Interface entre a câmara de vácuo e a lâmpada desenhada em SolidWorks..

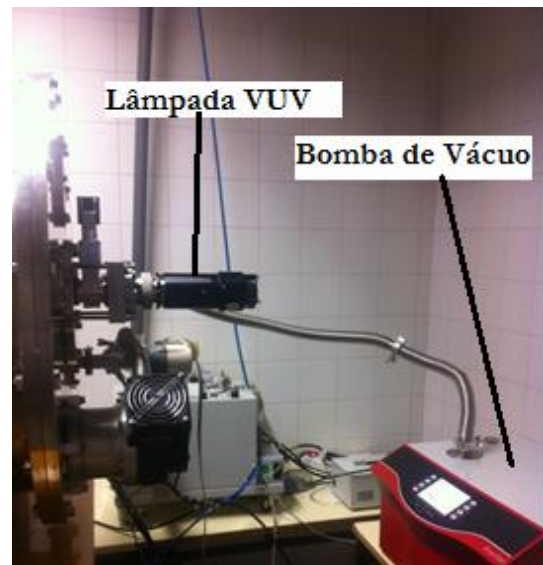


Figura 7.22 - Interface entre a câmara de vácuo e a lâmpada. Pode ainda observar-se a bomba de vácuo, responsável por fazer vácuo nesta zona de ligação no processo de retirar/colocar a lâmpada.

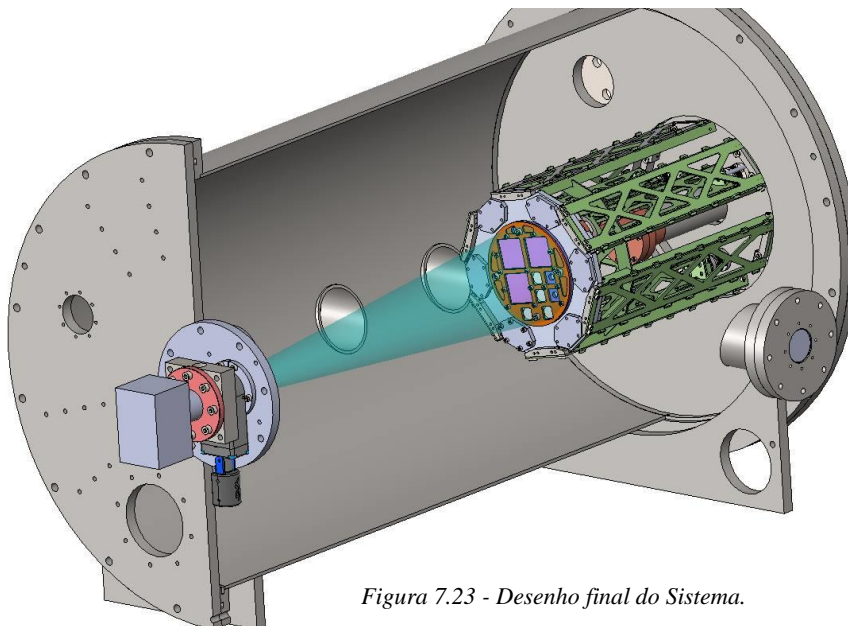


Figura 7.23 - Desenho final do Sistema.

## 8. Resultados do Programa de Irradiação UV no Simulador CENTRA-SIM

Antes de expor todas os processos que foram necessários desenvolver para dar início às medições no sistema de simulação, apresento já de seguida os cálculos teóricos que permitem estimar a corrente que é gerada no detetor e obter o número de sóis de VUV.

### 8.1. CÁLCULOS RADIOMÉTRICOS – ESTIMATIVA DA CORRENTE GERADA

O objetivo destes cálculos consiste em estimar a corrente gerada no detetor, de forma a que seja possível dimensionar o circuito de pré-amplificação do detetor. É importante salientar que estes cálculos são aproximações, pois não foi tida em conta a não-uniformidade da irradiância emitida pela fonte de VUV mas assumiu-se uma irradiância uniforme dentro do intervalo do seu ângulo sólido de emissão.

Em primeiro lugar, através de um programa de análise de gráficos, retiraram-se os pontos do espectro da irradiância para 50 cm da lâmpada L10366 e os pontos do espectro relativo das duas fontes (L10366 e L11798). Deste segundo espectro, retirou-se, então, uma constante multiplicativa de comparação entre as lâmpadas. Multiplicando este fator por cada um dos valores do espectro da lâmpada L10366, obtém-se aproximadamente os valores da irradiância espectral da lâmpada L11798, que é a lâmpada que é usado no Sistema. Os valores medidos pelo fabricante são fornecidos para uma medição segundo o eixo geométrico da fonte e a uma distância desta de 50 cm. A partir daqui, calculou-se, através da Lei do Inverso do Quadrado, os valores da irradiância espectral para a distância onde se encontra o detetor dentro da câmara (91.65 cm):

$$E_{91.65,\lambda} = \frac{E_{50,\lambda} d_1^2}{d_2^2} \quad (8.1)$$

sendo  $E_{50,\lambda}$  e  $E_{91.65,\lambda}$  a irradiância espectral para a distância de 50 cm e a irradiância espectral para a distância a que se encontra o detetor à lâmpada, respetivamente.  $d_1$  a distância para os dados dos gráficos (50 cm) e  $d_2$  a distância segunda a normal da lâmpada até ao plano do detetor (91.65 cm).

Contudo, como já se estudou anteriormente, esta relação utiliza-se apenas para o caso do detetor estar diretamente no eixo ótico da fonte como o ponto “X” da Figura 4.12, referente à Lei do Cosseno<sup>3</sup>. No nosso sistema, o detetor encontra-se por contrário desviado de 6,89 cm do eixo ótico. Desta forma, a irradiância no detetor deve ser estudada como na situação do ponto “Y” dessa figura. Visto que o detetor estará paralelo ao plano do porta amostras, a relação que permite obter os valores de irradiância espectral para a sua posição é descrita através de:

$$E_{91.65,\lambda}^* = E_{91.65,\lambda} (\cos \theta)^3 \quad (8.2)$$

sendo, então,  $E_{91.65,\lambda}$  a irradiância espectral calculada através da relação anterior. De notar que, na expressão anterior, não estamos a incluir qualquer dependência angular da radiação emitida, mas apenas o fator de calculo de fluxo numa superfície que não se encontra perpendicularmente à direção de incidência. Tendo em conta as posições definidas para o detetor (Figura 8.1) obtém-se um valor de  $\theta$  de  $4,30^\circ$ .

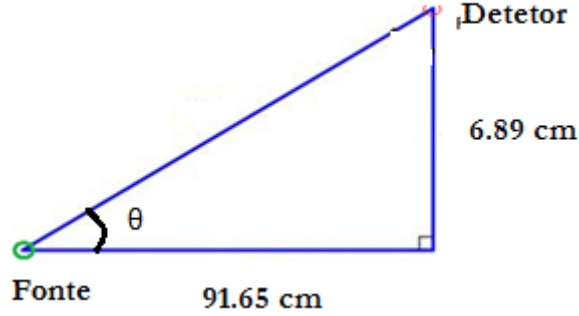


Figura 8.1 –Esquema da posição do detetor em relação à fonte. (Não está à escala)

Para determinar a corrente que é detetada no fototubo, recorre-se à relação entre a corrente e uma grandeza radiométrica. Através de uma *datasheet* geral de fototubos da *Hamamatsu* [14], podemos calcular a sensibilidade radiante ( $R$ ) que corresponde à razão entre a foto-corrente ( $I$ ) em amperes que flui no fotocátodo com a potência da luz incidente em watts na superfície do detetor ( $\Phi_{\text{detetor}}$ ), descrita através da seguinte equação:

$$R = \frac{I}{\Phi_{\text{detetor}}} \quad (8.3)$$

Sendo possível escrever as grandezas radiométricas, em função da sua grandeza radiométrica espectral, a irradiância pode ser descrita da seguinte forma:

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} d\lambda \quad (8.4)$$

sendo  $E_{\lambda}$  a irradiância espectral. Como a potência radiante à superfície do detetor representa o produto entre a irradiância e a área do detetor irradiada, pode registar-se esta grandeza do seguinte modo, para o caso em questão:

$$\Phi_{\text{detetor}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{91.65,\lambda} * A_{\text{detetor}} d\lambda \quad (8.5)$$

em que  $A_{\text{detetor}}$  é a área da janela do detetor.

Deste modo, a corrente detetada  $I$  é dada pela seguinte expressão:

$$I = \Phi_{\text{detetor}} R = A_{\text{detetor}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{91.65,\lambda} * R_{\lambda} d\lambda \quad (8.6)$$

em que  $R_{\lambda}$  é a sensibilidade radiante espectral.

Como já foram apresentadas anteriormente as expressões da irradiância espectral para a distância de 91.65 cm e com um desvio do eixo ótico de  $4.30^\circ$ , pode resolver-se a Equação 8.6 e determinar a corrente no detetor. Para resolver a integração é importante notar que, a cada valor de sensibilidade radiante corresponde um comprimento de onda, ao qual também corresponde igualmente um valor de irradiância espectral para uma distância de 91.65 cm. Obteve-se, deste modo, uma corrente de  $1.07 \times 10^{-4}$  mA. No eixo ótico, a corrente



esperada seria de  $1.08 \times 10^{-4}$  mA. Como se pode verificar, a influência do desvio do detector relativamente ao eixo ótico no valor da corrente é pequena.

É de notar que para resolver a Equação 8.6, foi necessário fazer uma interpolação dos dados dos gráficos das especificações técnicas da lâmpada e do detector, visto ser necessário que a diferença entre dois valores de comprimento de onda seguidos seja a mesma.

## 8.2. NÚMERO DE SÓIS DE VUV

Medindo-se a corrente gerada no detector (sendo conhecido o espectro da lâmpada e a resposta do detector) a partir da radiação emitida pela lâmpada é possível, a partir do valor adquirido, calcular o número de sóis de VUV (*number of VUV suns*). O número de sóis de VUV é definido como a razão entre a irradiância da lâmpada e a irradiância do espectro solar AM0, na gama de comprimentos de onda entre os 115-200 nm. Para referência, a irradiância do espectro solar, no topo da atmosfera, para a gama de comprimentos de onda 115-200 nm é  $1.073 \times 10^{-5}$  W/cm<sup>2</sup>.

A Equação 8.6 pode ser re-escrita, ainda, de outro modo:

$$I = A_{\text{detector}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{d,\lambda} R_{\lambda} d\lambda = A_{\text{detector}} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \kappa E_{n,\lambda} R_{\lambda} d\lambda = A_{\text{detector}} \kappa \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{n,\lambda} R_{\lambda} d\lambda \quad (8.7)$$

Em que  $\kappa$  é a constante de integração e  $E_{n,\lambda}$  a irradiância espectral da lâmpada normalizada. Desta forma, ao obter-se numa medição o valor da corrente, e sabendo-se o valor do integral da multiplicação da irradiância normalizada espectral da lâmpada e da sensibilidade radiante espectral do detector e a área da janela do detector, é possível determinar o valor de  $\kappa$ .

Como a irradiância pode ser escrita dependendo da sua grandeza espectral, como foi referido anteriormente, do seguinte modo,

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda} d\lambda = \kappa \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{n,\lambda} d\lambda \quad (8.8)$$

e tendo o valor de  $\kappa$  e do integral da curva normalizada da irradiância, é possível obter o valor da irradiância em W/cm<sup>2</sup> para o correspondente valor de corrente adquirido. O número de sóis, já referido anteriormente, é então possível de ser calculado através da divisão entre este valor de irradiância e o valor  $1.073 \times 10^{-5}$  W/cm<sup>2</sup>.

De modo a determinar o tempo necessário para simular a exposição à radiação VUV por 5000 horas no espaço (número de horas requerido pela ESA), dividem-se as mesmas pelo número de sóis. Isto é, obtém-se o tempo no laboratório equivalente às 5000 horas.

Através desta sequência de cálculos, determinam-se, durante os testes, o número de sóis e o tempo necessário em laboratório para atingir as horas exigidas do projeto. Estes números são apresentados no Capítulo 9.

## 8.3. CIRCUITOS DE OPERAÇÃO DO DETETOR

Um dos primeiros processos a desenvolver, para que se pudesse fazer as medições no sistema de simulação, foi desenvolver um circuito de operação do detector de VUV de forma a obter o sinal gerado neste. Para medir a corrente gerada no detector de VUV devida à radiação proveniente da lâmpada que incide na área ativa do mesmo, é necessário, deste modo, que o detector esteja ligado a um circuito que polariza o fototubo e converte a corrente num valor de tensão que pode ser lido diretamente numa interface de aquisição de dados.

Como se irá constatar, durante o trabalho desenvolvido foi necessário elaborar dois circuitos de operação, pois apenas após várias considerações é que se concluiu que o primeiro circuito realizado não era adequado aos testes finais na câmara de vácuo.

### 8.3.1. Circuito com Picoamperímetro

Numa primeira fase de testes, desenvolveu-se o seguinte circuito, que passo a designar “circuito com picoamperímetro” e que está representado na Figura 8.2.

Utilizou-se um conjunto de pilhas que geram uma tensão de 15 V, pois esta é a tensão recomendada para a operação do detetor. A opção de utilizar pilhas resultou de ser um processo seguro de evitar picos de sobretensão ou oscilações na alimentação. O picoamperímetro (*Model 485 Autoranging Picoammeter – Keithley*)<sup>14</sup> é essencial, neste caso, uma vez que as correntes geradas são da ordem dos 0.1  $\mu\text{A}$ . Este encontra-se em série com o detetor, para medir a corrente que passa no detetor em função da quantidade de radiação proveniente da lâmpada.

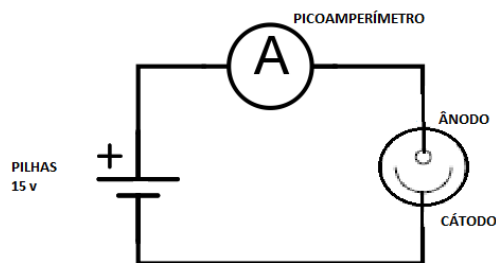


Figura 8.2 - Circuito com picoamperímetro.

Este circuito mais simples foi utilizado nos primeiros testes no sistema que se desenvolveu à parte da câmara e que será apresentado mais adiante (Sistema de Monitorização). Mais adiante são expostos os dados experimentais obtidos com este circuito. Na figura seguinte, pode observar-se a montagem deste circuito.

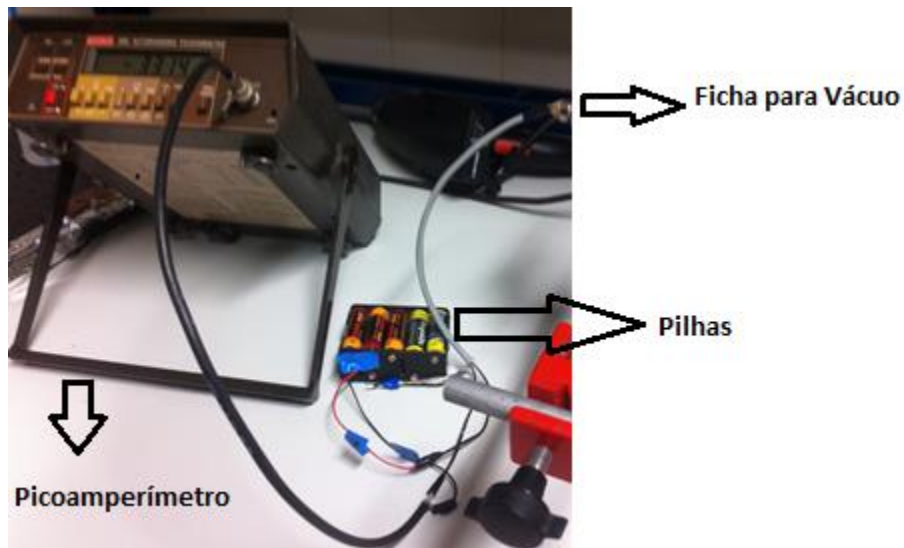


Figura 8.3 - Montagem do Circuito com Picoamperímetro.

<sup>14</sup> Tendo em atenção a facultação do picoamperímetro, aqui se deixa o agradecimento ao grupo ATLAS/LIP, pelo contributo e amabilidade.

No sistema de monitorização foi utilizada uma ficha para vácuo que permite ligar o detetor e o *socket* do mesmo, que se encontram em vácuo, com o restante circuito, exposto à pressão atmosférica.

Depois de desenvolvido e utilizado este circuito, verificou-se que este traria alguns inconvenientes, quando fosse necessário colocar o detetor na sua posição final, dentro da câmara de vácuo. Como o circuito não poderia ficar no interior da câmara, seria necessário utilizar fios de ligação muito extensos entre o detetor e o circuito, o que implicaria um nível de ruído elevado. Para além disto, o facto de se usar como fonte de alimentação do circuito um conjunto de pilhas, induziria a possibilidade de drift da tensão ao longo do tempo, visto os testes dentro da câmara de vácuo se prolongarem durante alguns meses, obtendo-se assim valores de corrente com um erro sistemático elevado.

Para obviar a estes problemas, projetou-se e implementou-se outro circuito que pudesse ser colocado no interior da câmara, durante os testes, e cujo sinal de saída fosse em tensão, para ser lido por uma interface comum de aquisição de dados utilizando o programa *Labview*.

### 8.3.2. Circuito de Aquisição

O circuito final de operação que se desenvolveu é o seguinte:

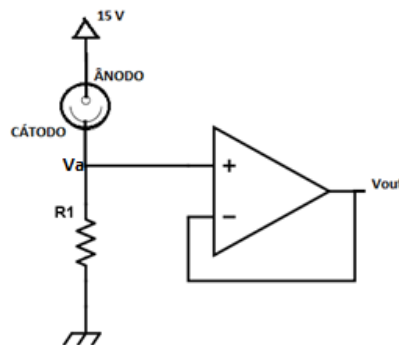


Figura 8.4 - Circuito de Aquisição.

Este circuito é constituído por uma resistência por onde flui a corrente que atravessa o detetor, seguido de um seguidor de tensão com impedância de entrada elevadíssima e foi denominado circuito de aquisição. Neste caso, o seguidor de tensão deve garantir que a corrente é praticamente igual na resistência  $R_1$  e no detetor, o que implica que a corrente que flui para a entrada do amplificador operacional é muito inferior.

Neste circuito, a resistência  $R_1$  tem o valor de 10 M $\Omega$ . Esta resistência foi dimensionada para que correntes típicas de 01  $\mu$ A gerassem uma tensão de saída de 1V.

Para testar o funcionamento do circuito e verificar que a corrente que entra no amplificador não tem efeito apreciável, substitui-se o detetor por uma resistência de 10 M $\Omega$  e alimentou-se o circuito com uma tensão aproximada de 15 V.

Como no teste do mesmo se utilizaram duas resistências iguais, e se não existir corrente apreciável na entrada do amplificador operacional, verifica-se o seguinte:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{2} \quad (8.9)$$

Deste modo, sendo  $V_{in}=15$  V, quando com um voltímetro se mede a tensão de saída  $V_{out}$ , esta deve ser 7.5 V. E foi tida em conta a impedância interna do voltímetro. Adicionou-se ainda um retificador de tensão ao circuito da Figura 8.4, de modo a garantir que a tensão no ânodo do detetor era de aproximadamente 15V.

Com um multímetro de precisão verificou-se que o circuito de alimentação e retificação gerava uma tensão de 14.51 V. Designamos esta tensão de alimentação por “tensão retificada”. De seguida, mediu-se o valor da tensão de saída  $V_{out}$  do circuito. Obteve-se um valor médio da tensão de saída de 7.24 V.

Tendo em conta que a tensão retificada de 14.51 V e a Equação 8.9, verifica-se que  $V_{out}$ , teoricamente, deveria tomar o valor de 7.26 V quando as duas resistências usadas são iguais. Deste modo, obteve-se um erro relativo de  $V_{out}$  de 0.16%, o que é muito inferior ao erro do valor de incerteza do valor das resistências e é compatível com um valor negligenciável de corrente de entrada no amplificador. O circuito ainda seria utilizável se a corrente de entrada do amplificador pudesse ser modelada por uma resistência de entrada conectada à massa correspondendo esta a uma resistência em paralelo com  $R_1$ .

Depois de testado o circuito, soldou-se o mesmo, sem o detetor, e fez-se *potting* com *stycast*. Desta forma, o circuito ficou revestido totalmente por um composto gelatinoso (*stycast*) que, depois de seco, fica sólido. Este procedimento, realizado dentro de uma caixa de chapa de alumínio, é essencial, visto que o circuito tem de ficar em vácuo na câmara. Caso contrário, os componentes eletrônicos podem aquecer demasiado e eventualmente queimarem-se, uma vez que em vácuo dissipariam apenas potência calorífica por radiação e condução no pcb. Pode, também, ocorrer *outgassing*, neste caso devido à libertação de ar contido dentro dos componentes eletrônicos, o que atrasaria a obtenção de alto vácuo, ou os mesmos podem inclusivamente explodir, o que não permitiria manter um ambiente limpo de elevado vácuo.

Na figura seguinte pode observar-se o resultado final da soldadura e do *potting*.

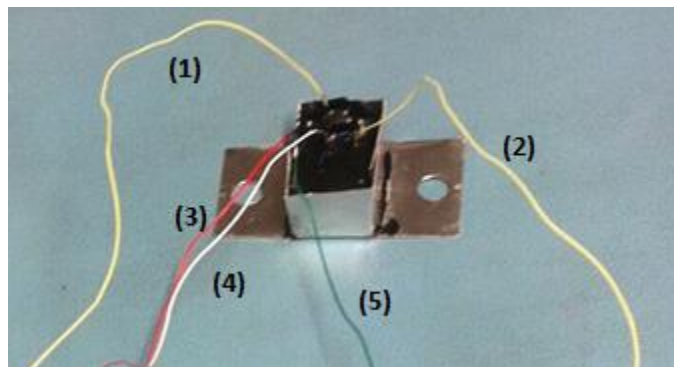


Figura 8.5 - Circuito com Stycast. (1) Alimentação do retificador de tensão; (2) Fio liga ao ânodo do detetor; (3) Tensão de Saída  $V_{out}$ ; (4) Ground; (5) Fio liga ao cátodo do detetor.

Depois de se ter procedido ao *potting*, foi necessário verificar se o circuito continuava a funcionar corretamente. Utilizou-se novamente, no lugar do detetor, uma resistência de 10 M $\Omega$  e, portanto, verifica-se  $R_1=R_2$ .

Utilizando uma tensão DC de 14.51 V reproduziu-se o valor da tensão de saída  $V_{out}$  do circuito com um valor médio de 7.24 V.

Verifica-se, deste modo, que o circuito não ficou danificado, ao ser feito o *potting*, e que pode ser utilizado para os testes seguintes.

Ao longo do desenvolvimento do sistema, foi compreendido que o circuito desenhado e implementado não foi o mais apropriado pois não garantia uma tensão de polarização do fototubo constante e independente da corrente. O circuito correto, representado na figura seguinte, faz uso do ganho do amplificador para manter o cátodo do fototubo a tensão próxima de zero, mantendo o fluxo de corrente significativa a fluir pela resistência  $R_1$ . O ganho em tensão/corrente passa a ser negativo. Este circuito não chegou a ser

implementado pois, como se verá seguidamente, a deposição de uma película sobre a superfície do fototubo impediu a sua utilização dentro da câmara.

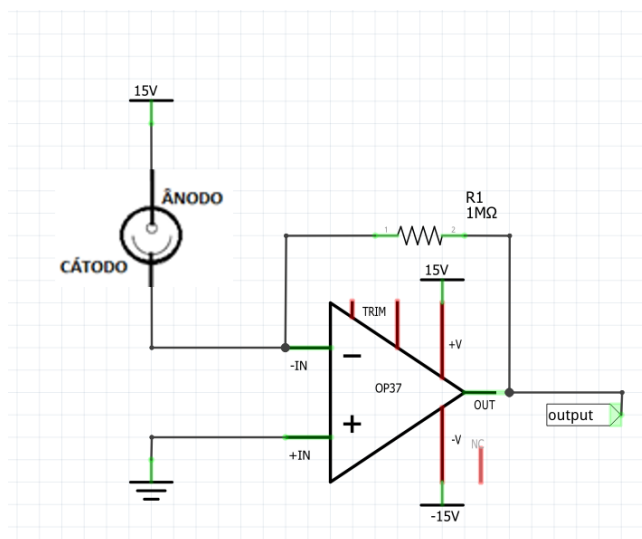


Figura 8.6 – Circuito corrigido de Aquisição.

#### 8.4. SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO

Terminado o estudo dos circuitos de operação do detetor VUV, o passo seguinte consistiu na elaboração de um sistema que permitiu testar a lâmpada e o detetor em vácuo, antes de eles serem colocados na câmara de vácuo. Para além disto, este sistema permitiu calibrar o circuito de aquisição, tomando como padrão o circuito do picoamperímetro. Neste sistema, a janela do detetor encontra-se normal ao eixo ótico da lâmpada.

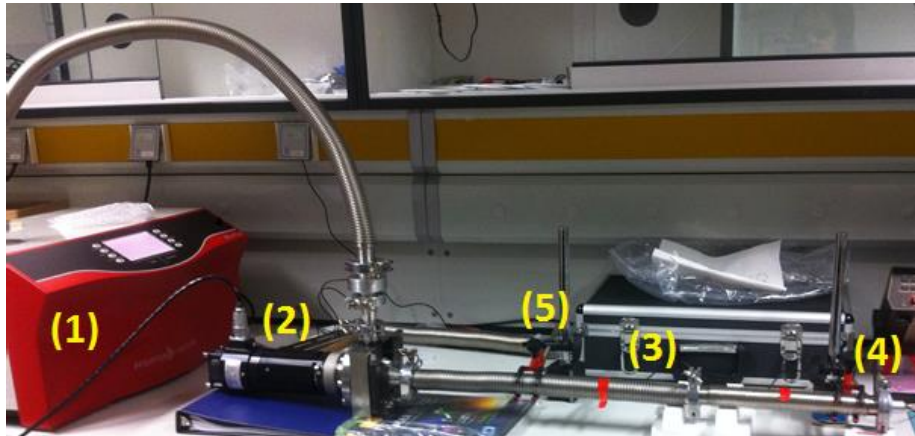


Figura 8.7 - Sistema de Calibração. (1) Detetor de fugas/Bomba de Vácuo; (2) Lâmpada VUV; (3) bellows; (4) Ficha para vácuo; (5) Suporte dos tubos.

Nas Figuras 8.7 e 8.8, pode observar-se o sistema desenvolvido. De uma forma simples, este sistema é constituído por um detetor de fugas que é também uma bomba de vácuo (Figura 8.7 – (1)), que, como o nome indica, permite efetuar vácuo e detetar qualquer fuga existente no sistema, por uma lâmpada de VUV (Figura 8.7 – (2)), um conjunto *bellows* (Figura 8.7 – (3)), que surgem alinhados segundo o eixo ótico da lâmpada, por uma ficha de vácuo (Figura 8.7 – (4)), que se situa na extremidade do último tubo do sistema. Na zona da ficha, que fica em vácuo, encontra-se soldado o *socket* do detetor, onde se encaixa o detetor, cuja janela se encontra no eixo ótico da lâmpada.

Assumiui-se, nesta montagem, que a luz VUV não se reflete na superfície de inox interna dos *bellows*.

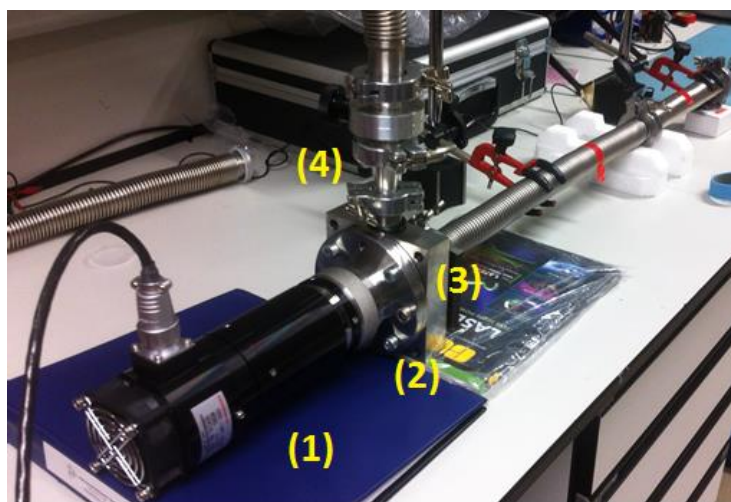


Figura 8.8 - Sistema de Calibração. Aproximação da zona de ligação entre a lâmpada e os tubos. (1) Lâmpada; (2) Peça de adaptação da lâmpada ao sistema; (3) Cubo; (4) Zona que liga o sistema ao detetor de fugas/bomba de vácuo.



Depois de montado o sistema de calibração e antes de iniciar qualquer teste, em primeiro lugar ligava-se o detetor de fugas. A lâmpada de VUV era ligada apenas quando era atingido um vácuo da ordem dos  $10^{-5}$  mbar.

É de notar que todos os elementos deste sistema, antes de qualquer operação, foram limpos com álcool isopropílico (IPA) numa tina de ultrassons.

Foram, então, utilizados os dois circuitos de operação do detetor mencionados anteriormente, isto é, o circuito com o picoamperímetro e o primeiro circuito de aquisição, e utilizaram-se diferentes tubos de forma a obter três distâncias distintas entre a lâmpada e a janela do detetor. Apresentam-se seguidamente os dados experimentais obtidos para cada situação.

### 8.5. TESTES COM CIRCUITO DO PICOAMPERÍMETRO

Na Figura 8.11, encontra-se o sistema de monitorização e o circuito com o picoamperímetro e na tabela seguinte podem ver-se os dados obtidos para diferentes distâncias. Para cada distância, registam-se três valores de corrente visualizados no picoamperímetro.

Sabendo que a área da janela do detetor é igual a  $0.5027\text{cm}^2$ , obtêm-se a partir dos cálculos descritos nos capítulos introdutórios a irradiância, o número de sóis e o tempo de laboratório necessário equivalente às horas exigidas para cada distância mencionada na tabela anterior.

Como já foi estudado, a irradiância varia com o inverso do quadrado da distância. Deste modo, espera-se que a corrente também varie desta forma com a distância. Na Figura 8.9, pode observar-se a variação da corrente com o inverso do quadrado da distância, verificando-se uma relação linear. Este facto consubstancia também a assunção de que a contribuição da luz refletida nas paredes interiores do *bellow* de inox não é importante pois a intensidade desta escalaria com a exponencial da distância. Os pontos do gráfico possuem as respetivas barras de incerteza. O balanço de incerteza encontra-se no Anexo A.

*Tabela 8-1 – Valores de irradiância, número de sóis e dias equivalentes calculados para os valores de corrente obtidos com o circuito do picoamperímetro. Os dias equivalentes correspondem ao número de dias em laboratório necessários para simular as 5000 horas no espaço.*

Distância (mm)	Corrente média ( $\mu\text{A}$ )	Irradiância ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )	Número de Sóis	Dias equivalentes
<b>616.88</b>	0.8513	$9.23 \times 10^{-5}$	8.69	23.99
<b>848.12</b>	0.3910	$4.28 \times 10^{-5}$	3.99	52.23
<b>875.87</b>	0.3065	$3.36 \times 10^{-5}$	3.13	66.61

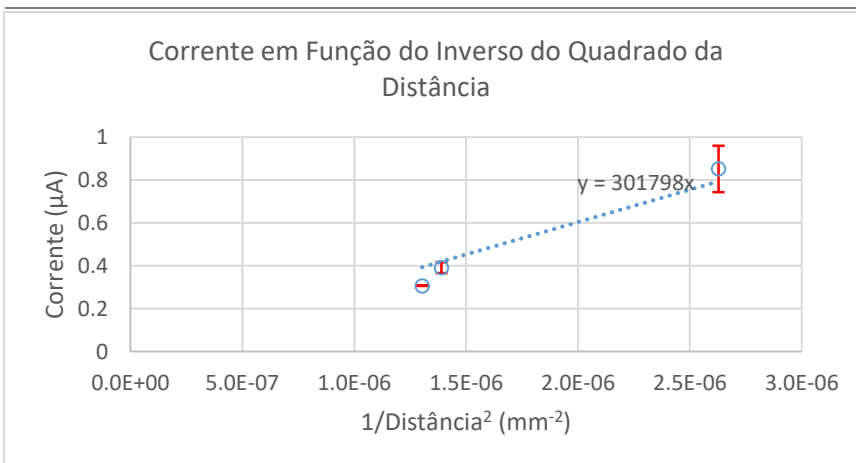


Figura 8.9 – Gráfico da corrente em função do inverso do quadrado da distância entre a lâmpada e o detetor.

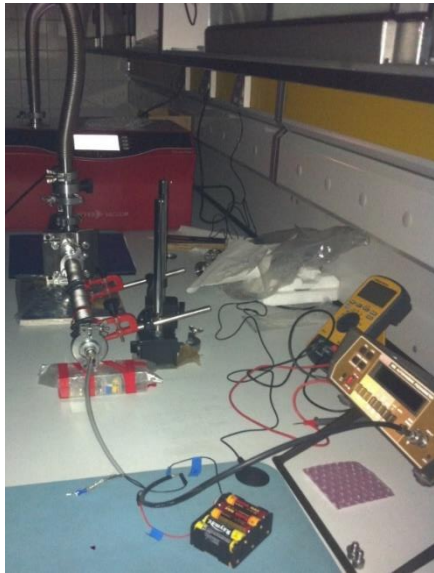


Figura 8.11 - Sistema de Monitorização com o circuito do picoamperímetro.

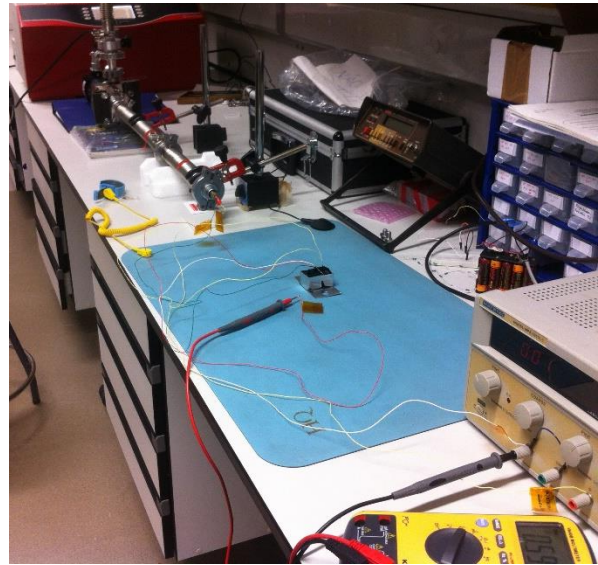


Figura 8.10 - Sistema de Monitorização com Circuito de Aquisição.

## 8.6. TESTES COM CIRCUITO DE AQUISIÇÃO

Para testar este circuito no sistema de monitorização, utilizaram-se as mesmas distâncias entre a lâmpada e a janela do detector.

Neste caso, o sinal obtido é uma tensão ( $V_{out}$  da Figura 8.4) e a corrente gerada é calculada, considerando a resistência de  $10\text{ M}\Omega$ .

Para introduzir o menor erro possível, para cada medição do sinal de saída verificou-se sempre que a tensão retificada era de aproximadamente  $14.60\text{ V}$ . Foram realizadas três medições da tensão de saída para cada distância.

Para o caso em estudo, tem-se a seguinte tabela.

Tabela 8-2 - Valores de irradiância, número de sóis e dias equivalentes calculados para os valores de corrente obtidos com o circuito de aquisição. Os dias equivalentes correspondem ao número de dias em laboratório necessários para simular as 5000 horas no espaço.

Distância (mm)	$V_{out}$ médio (V)	Corrente média ( $\mu\text{A}$ )	Irradiância ( $\text{W}/\text{cm}^2$ )	Número de Sóis	Dias equivalentes
<b>616.88</b>	9.12	0.9123	$9.99 \times 10^{-5}$	9.31	22.38
<b>848.12</b>	3.84	0.3835	$4.20 \times 10^{-5}$	3.91	53.24
<b>875.87</b>	3.18	0.3179	$3.48 \times 10^{-5}$	3.24	64.23

Apesar da resistência utilizada ter valores muito elevados o que induziu uma alteração substancial da tensão de polarização do fototubo, os valores obtidos são de alguma forma comparáveis aos medidos com o picoamperímetro.



### 8.7. RETA DE CALIBRAÇÃO DO CIRCUITO DE AQUISIÇÃO

De forma a realizar a calibração do circuito de aquisição, tomando o circuito com o picoamperímetro como padrão, em primeiro lugar, procedi ao cálculo da incerteza expandida do número de sóis VUV dos valores obtidos com o picoamperímetro e com o circuito de aquisição. No anexo B, encontra-se o cálculo destas incertezas.

A expressão que permite calcular o número de sóis de VUV (N), a partir da corrente I gerada no detetor, tendo em conta o pequeno estudo feito na Introdução deste documento, é a seguinte:

$$N = cI \quad (8.10)$$

Em que c é a constante dada por:

$$c = \frac{\int E_{N,\lambda} d\lambda}{1.073 \times 10^{-5} A_{\text{detetor}} \int E_{N,\lambda} R_{N,\lambda} d\lambda} = 1.02 \times 10^4 mA^{-1} \quad (8.11)$$

Pode daqui concluir-se que, teoricamente, a relação entre o número de sóis e a corrente é linear.

A expressão que relaciona o número de sóis de VUV com a tensão de saída do circuito de aquisição é a seguinte:

$$N = c \frac{V_{out}}{R1} \quad (8.12)$$

Em que c é a constante mencionada anteriormente e R1 a resistência do circuito de aquisição.

Desta forma tem-se:  $\frac{c}{R1} = 1.02 V^{-1}$  (8.13)

Tal como anteriormente, verifica-se que a relação entre o número de sóis e a tensão de saída também é linear.

De seguida, encontra-se o gráfico do número de sóis calculado a partir dos valores de tensão obtidos com o circuito de aquisição já corrigidos ( $N_{\text{corrigidos}}$ ), de acordo com a calibração feita, em função da tensão de saída  $V_{out}$  e com as respectivas barras de erro.

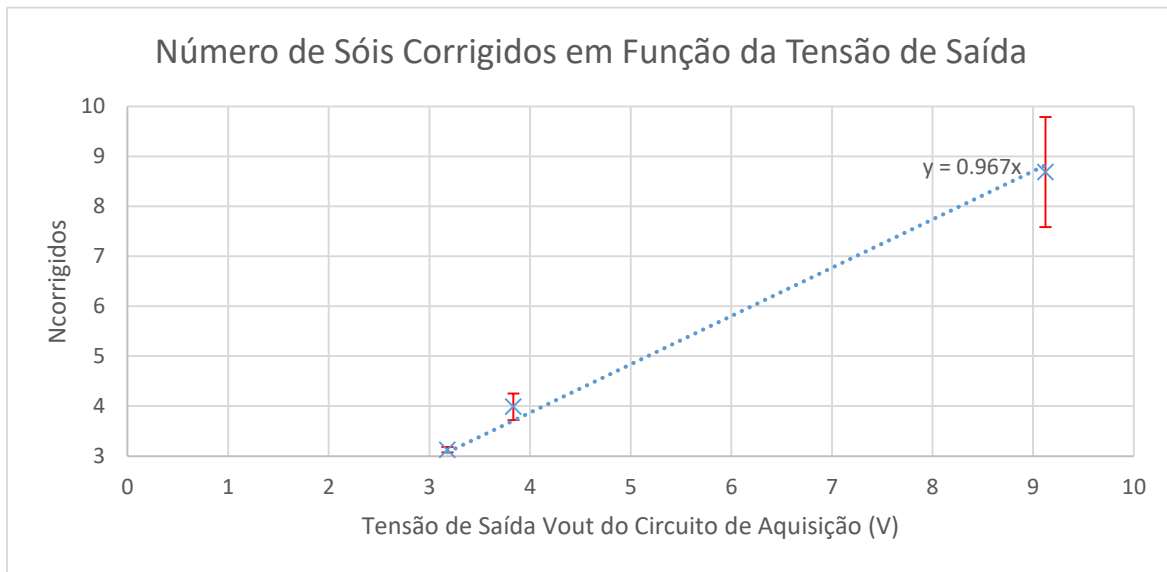


Figura 8.12 – Gráfico da relação entre o número de sóis corrigidos e a tensão de saída do circuito de aquisição.

## 8.8. PRIMEIRA SÉRIE DE VALORES DE CORRENTE NO SISTEMA DE SIMULAÇÃO

Como antes referido, o detetor encontra-se ligado ao circuito de aquisição pelos dois fios que correspondem ao ânodo e ao cátodo do detetor. Os três fios restantes são os que saem da câmara através de uma ficha para vácuo. O fio que representa o sinal de saída  $V_{out}$  do circuito de aquisição (ver Figura 8.4) foi ligado a um conversor analógico-digital e a uma placa da *National Instruments* para que possa ser lido no computador no programa *Labview*. Tal como já mencionado nos Testes no Sistema de Monitorização com o Circuito de Aquisição, para se obter o valor da corrente gerada basta dividir o sinal de saída  $V_{out}$  pelo valor da resistência  $R1$  (Figura 8.4), sendo esta a expressão que o *Labview* executa. Por último, os fios que representam a massa e a alimentação do circuito estão ligados a uma fonte de alimentação.

Depois de fechada a câmara de vácuo e atingido o vácuo necessário (da ordem dos  $10^{-4}$  mbar), ligaram-se a fonte de alimentação e a lâmpada de VUV e, passados 20 segundos, começaram a obter-se os primeiros valores de corrente.

Através da calibração feita (Figura 8.12), para uma tensão média de saída de 2.35 V, obteve-se  $(2.27 \pm 0.2)$  sóis de VUV para a posição onde se encontra o detetor. Para esta análise consideraram-se apenas os primeiros sete valores obtidos.

A irradiância para a posição do porta-amstras é de  $2.61 \times 10^{-5} \text{ W/cm}^2$ , o que equivale a 2.43 sóis de VUV. Desta forma, é necessário que, durante cerca de dois meses, as amostras estejam submetidas à radiação VUV, de modo a simular as 5000 horas no espaço.

Deste modo, prosseguiram-se os testes com os dois subsistemas a funcionar em simultâneo de forma a completar o tempo necessário de exposição à radiação e ciclos térmicos das amostras.

## 8.9. INTERRUPTÃO DA PRIMEIRA SÉRIE DE TESTES NO SISTEMA DE SIMULAÇÃO

Passados alguns dias de operação do sistema de simulação, verificou-se que o sinal em corrente gerado no detetor de VUV diminuiu abruptamente.

Segundo as indicações do manual de instruções da lâmpada, esta deve ser utilizada num meio de elevado vácuo ou num meio com um gás inerte, caso contrário, dependendo da atmosfera em que é usada, pode ocorrer uma reação fotoquímica e formar-se uma película fina de material orgânico na janela da lâmpada, provocando a redução da transmitância ótica. Apesar da câmara estar em vácuo, depois de se detetar esta redução do valor da corrente, pensou-se que esta se devia à contaminação fotoquímica na janela da lâmpada. Desta forma, manteve-se a câmara em vácuo, e retirou-se a penas a lâmpada. Limpou-se a sua janela com IPA e constatou-se que se tinha realmente depositado uma película de material sobre a mesma. Através de vários estudos já feitos sobre sistemas de vácuo de VUV, foi possível concluir que este fenómeno é comum e que exige a limpeza da lâmpada regularmente.

Depois de limpa, a lâmpada foi colocada novamente no sistema de simulação e, depois de ligada, continuou-se a obter valores de corrente muito baixos relativamente aos iniciais. Posto isto, foi necessário parar os testes para se abrir a câmara de vácuo e se analisar o estado do detetor e do circuito de aquisição. Rapidamente se observou que a janela do detetor estava coberta com uma fina película de material depositado que foi de seguida limpa.

A fina camada que cobriu a janela do detetor deve-se à acumulação de partículas resultantes do *outgassing* que ocorre, muito provavelmente, nas próprias amostras e nos materiais circundantes ao detetor, como por exemplo, a pequena *pcb* onde se encontra soldado o *socket* do detetor.

Para confirmar se algum dos elementos do sistema VUV estava a funcionar incorretamente, testou-se o circuito de aquisição com uma resistência de 10 M $\Omega$  no lugar do detetor, isto é, encaixada no *socket* dentro da câmara de vácuo e, com o sistema de monitorização, avaliou-se tanto o funcionamento da lâmpada como do detetor. Durante o teste do circuito, foram retiradas medições ao longo do tempo para apurar se a

resistência aquecia e se esse efeito afetava o funcionamento do circuito. Tal não se verificou e reconfirmou-se, então, o funcionamento correto do mesmo.

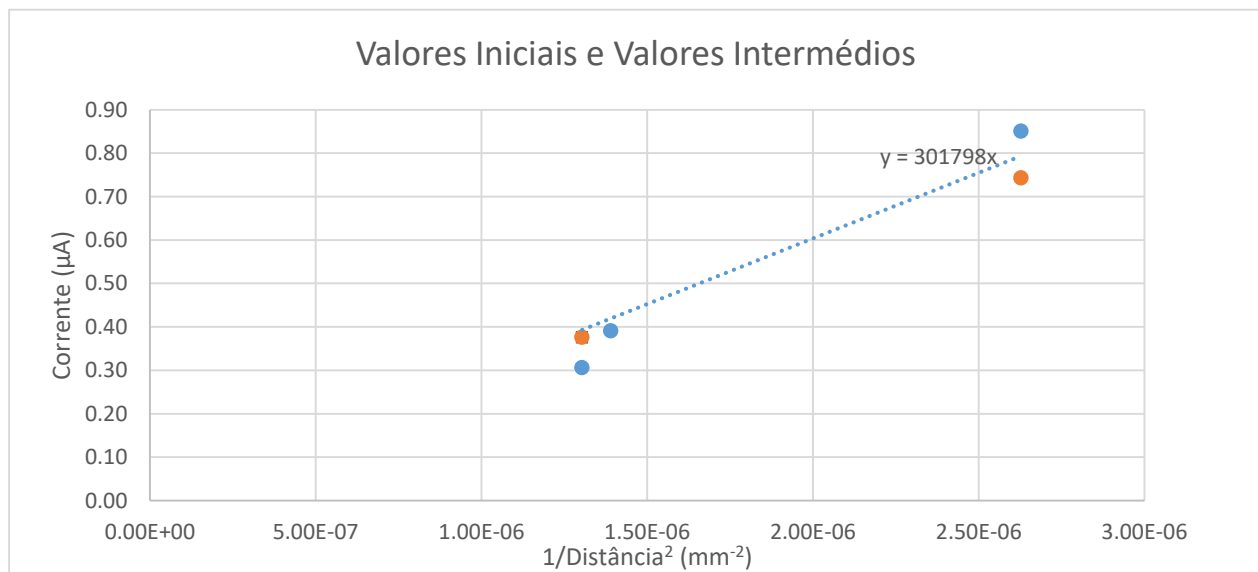
Com o sistema de monitorização, testou-se a lâmpada e o detetor para as distâncias extremas já utilizadas, ou seja, para 875.87 mm e 616.88 mm. Na Figura 8.13 estão expostos os valores iniciais obtidos e os valores realizados durante a interrupção dos testes (passadas 352 horas de operação da lâmpada).

No intuito de comprar as duas medições, tomou-se em consideração a sensibilidade das medidas associada à distância, pois, mesmo sendo distâncias nominalmente iguais, está associada a estas uma incerteza. Com a estimativa realizada percebeu-se que o impacto é pouco significativo, sendo que a incerteza associada à distância se majorou por  $1.0 \times 10^{-5}$  mA/mm.

Na Tabela 8.3 encontram-se os erros relativos entre os valores de corrente obtidos para as mesmas distâncias.

*Tabela 8-3 – Diferenças percentuais entre os valores de corrente obtidos para o início de vida da lâmpada e para passadas 352 horas de operação.*

Distância (mm)	Corrente Inicial ( $\mu\text{A}$ )	Corrente Nova ( $\mu\text{A}$ )	Diferença Percentual (%)
<b>616.88</b>	0.8513	0.7432	12.68
<b>875.87</b>	0.3065	0.3764	22.81



*Figura 8.13 - Gráficos dos valores de corrente do início do tempo de vida da lâmpada (a azul) e de passadas 352 horas de operação da lâmpada (a cor de laranja).*

Era de esperar que os valores de corrente obtidos fossem inferiores passadas 352 horas de operação, pois a lâmpada vai perdendo potência ao longo do seu tempo de vida. Contudo, para as maiores distâncias, essa diminuição não se verificou.

Para os dois valores de corrente da tabela anterior, calculou-se o número de sóis correspondentes para a distância da lâmpada ao porta-amostras através da Lei do Inverso do Quadrado e considerou-se o número de sóis médio entre os valores calculados. Este valor é de 3.69 e foi obtido depois de a lâmpada operar 352 horas no sistema de simulação.

Depois de feitas as medições para testar todos os elementos do sistema de simulação de VUV, voltou-se a fechar a câmara de vácuo com o detetor dentro da mesma. Obtiveram-se novamente os valores de corrente

esperados, mas, como se previa, devido à contaminação da janela do detetor e da lâmpada, os valores diminuíram abruptamente passadas algumas horas de operação. Deste modo, optou-se por dar continuidade aos testes e estudar apenas no final dos mesmos a variação da corrente em função da distância no sistema de monitorização, de forma a verificar qual a variação de potência da lâmpada depois de cerca de dois meses de operação. Este procedimento, sem ser implementada uma estratégia de limpeza do detetor, não permite assim monitorizar continuamente durante os testes o funcionamento da lâmpada.

Com esta alternativa, tomaram-se como valores iniciais os valores do gráfico da Figura 8.9, valores medidos imediatamente antes de se iniciarem os testes, isto é, no início de vida da lâmpada. A partir da linha de tendência deste, considerou-se que o número de sóis inicial para a distância entre a lâmpada e o porta-amostras é de 3.89. Para este valor de número de sóis, tal como para a análise feita com o circuito de aquisição, o tempo necessário para simular a exposição das amostras à radiação VUV durante 5000 horas no espaço equivale a, também, cerca de 2 meses no sistema de simulação.

#### 8.10. FIXAÇÃO E REMOÇÃO DE RADICAIS ORGÂNICOS

Como foi referido anteriormente, verificou-se que a janela de Fluoreto de Magnésio da lâmpada, após algumas horas de operação, apresentava contaminação, possivelmente gerada por efeito fotoquímico sobre os materiais que resultam de *outgassing* do sistema de vácuo. Este tipo de efeitos é já bem conhecido na literatura [15]. Na referência, encontra-se um estudo sobre a utilização de plasmas para a limpeza das superfícies interiores de criostatos. As espécies ativadas de um plasma incluem átomos, moléculas, iões, eletrões, radicais livres e fótons da gama VUV. No processo de limpeza estudado da referência [15], os fótons VUV do plasma, eficazes na rutura da maior parte de ligações orgânicas, ajudam a separar os contaminantes depositados nas superfícies. Como o gás, neste estudo, é o oxigénio, uma segunda ação de limpeza é acarretada pelos iões de oxigénio do plasma. Estes reagem com contaminantes de hidrocarbonetos depositados na superfície contaminada para produzir monóxido de carbono e dióxido de carbono. Estes compostos são facilmente bombeados para fora e a superfície fica limpa. O nosso sistema induz a maioria destes efeitos que, contudo, têm nele consequências que é necessário ultrapassar.

Em sistemas de vácuo, é assim importante saber qual a degradação que ocorre no sinal de saída da lâmpada em função do tempo de funcionamento da mesma. Os contaminantes que se fixam na janela de Fluoreto de Magnésio da lâmpada diminuindo diminuem significativamente o seu sinal de saída ao longo do tempo. A diminuição da transmitância de VUV da janela de Fluoreto de Magnésio pode ser maior do que um por cento por hora, nestes sistemas [7].

Testes no Centro de Pesquisa Glenn da NASA (*NASA Glenn Research Center*) indicam que a degradação na intensidade da radiação VUV nos comprimentos de onda 115-200 nm foi de 0.7% por hora [7]. Nesses testes, a limpeza da janela da lâmpada foi feita com um composto de diamante cujas partículas possuem 6 micrómetros de tamanho para polir a superfície da janela, seguindo-se uma lavagem da mesma com álcool, sendo, no final, seca com azoto. Esta limpeza, segundo os resultados que se obtiveram, permitiu restaurar o sinal de saída da lâmpada, obtendo-se valores semelhantes aos iniciais.

Apesar destas lâmpadas de deutério emitirem radiação que não pode ser transmitida no ar, o seu tempo de vida é muito curto quando estas operam completamente dentro de uma câmara de vácuo. Segundo estudos feitos pela NASA, chegou-se à conclusão de que um conjunto de 16 lâmpadas de deutério possuía uma vida média de mais de 75 horas quando as mesmas foram colocadas a operar totalmente dentro da câmara de vácuo. Uma alternativa de posicionar a lâmpada totalmente dentro da câmara de vácuo, consiste em colocar o corpo da lâmpada fora da câmara de vácuo e o tubo de projeção da mesma dentro da câmara. Para garantir o vácuo dentro da câmara, o tubo de projeção da lâmpada é empurrado, através duma montagem com o-

*ring*, contra uma das flanges da câmara. Nestas condições, as lâmpadas permanecem funcionais durante pelo menos várias centenas de horas a operar. Esta é a montagem que seguimos no nosso sistema.

## 9. Conclusão dos Testes no Sistema de Simulação

Deram-se por concluídos os testes no sistema de simulação passadas 2142 horas de irradiação e ciclos térmicos. Este tempo foi calculado tendo em consideração as interrupções de exposição das amostras à radiação devidas à necessidade de limpeza da lâmpada regularmente.

### 9.1. NÚMERO DE SÓIS DE VUV E HORAS EQUIVALENTES DE SOL (EHS)

No final dos testes, realizou-se uma série de medições de corrente para várias distâncias no sistema de monitorização. Na Figura 9.1, pode observar-se, então, a variação da corrente em função do inverso do quadrado da distância entre a lâmpada e o detetor depois de finalizados os testes no sistema de simulação.

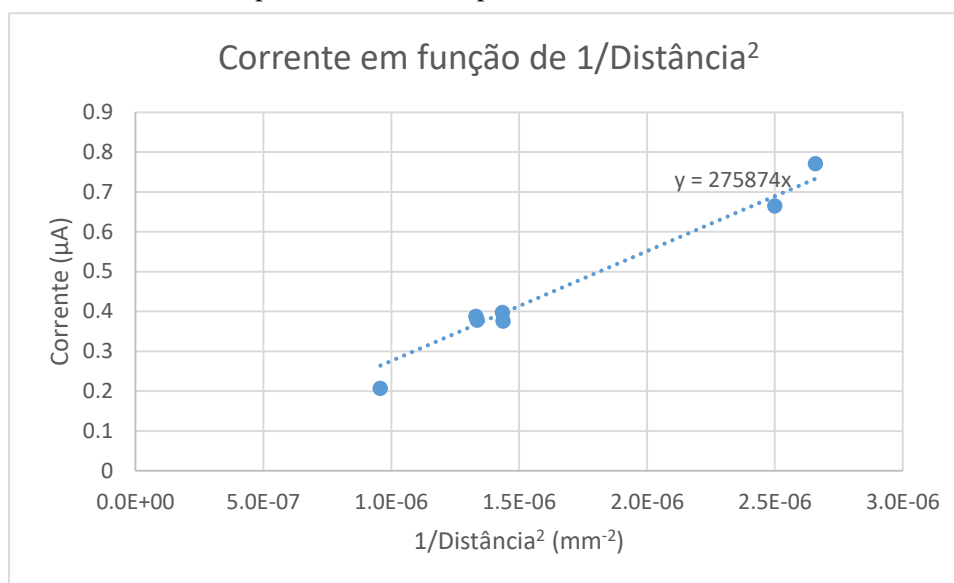


Figura 9.1 - Gráfico da corrente em função do inverso do quadrado da distância. Estes valores foram obtidos depois de a lâmpada operar durante 2142 horas.

No gráfico seguinte, estão representados os valores iniciais de corrente e os valores medidos depois dos testes em função do inverso do quadrado da distância entre a lâmpada e o detetor no sistema de monitorização.

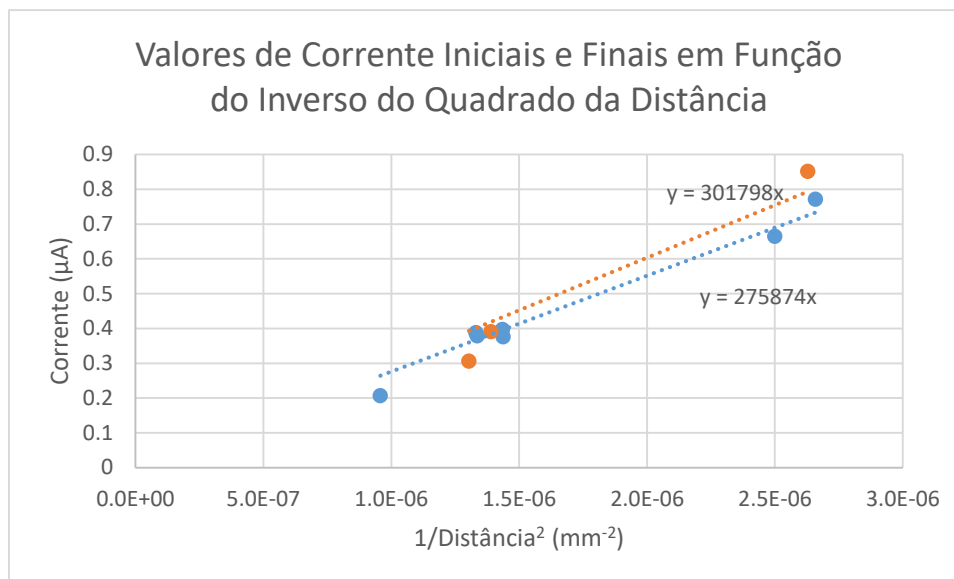


Figura 9.2 - Valores iniciais de corrente (início de vida da lâmpada – a cor de laranja) e valores finais de corrente (passadas 2142 horas de operação da lâmpada – a azul) em função do inverso do quadrado da distância entre a lâmpada e o detector.

Através do gráfico anterior (Figura 9.2), pode verificar-se que, tal como aconteceu nas medições iniciais (antes dos testes na câmara de vácuo), a corrente varia linearmente com o inverso do quadrado da distância entre a lâmpada e o detector. Daqui compreende-se que a relação teórica que se esperava entre a distância e a corrente se manteve depois dos testes e que, portanto, a lâmpada, o detector e o circuito do picoamperímetro continuam a funcionar corretamente.

O procedimento que permitiu obter estes valores de corrente foi semelhante ao realizado para os valores medidos no início de vida da lâmpada. Contudo, foram feitas, desta vez, medidas para um número superior de diferentes distâncias entre a lâmpada e o detector, incluindo os valores de distância utilizadas no estudo inicial.

Como se pode verificar na Figura 9.2, para as distâncias mais curtas entre a lâmpada e o detector, os valores de corrente sofreram uma diminuição de cerca de 4% passadas as horas de operação da lâmpada durante os testes. Contudo, para maiores distâncias a situação parece ser oposta, embora uma pequena diminuição da intensidade seja um fenómeno que já era de esperar. No conjunto, e atendendo à nossa estimativa de erros para a medição, podemos apenas dizer que os valores são compatíveis com a degradação da intensidade da lâmpada de UV, apesar de esta ser ligeira.

Para distâncias maiores, a dificuldade em alinhar o sistema de monitorização (Figura 8.7) de maneira a que o detector estivesse centrado segundo o eixo ótico da lâmpada era superior. Muito provavelmente, este facto, contribuiu para que os valores de corrente em função da distância não sofressem a diminuição que se verificou para distâncias inferiores.

Através da linha de tendência dos valores iniciais de corrente, obtém-se, para a distância entre a lâmpada e o porta-amostras dentro da câmara de vácuo (88.96 cm), uma corrente de 0.3814 µA, o que corresponde a 3.89 sóis. E para a linha de tendência dos valores finais de corrente, um valor de 0.3486 µA, correspondente a 3.56 sóis.

Sendo  $N_{io}$  o número de sóis inicial para a distância do porta-amostras dentro da câmara de vácuo e a lâmpada estivesse limpa e  $N_{if}$  o número de sóis final para a distância entre o porta-amostras e a lâmpada,

igualmente, dentro da câmara de vácuo e a lâmpada estivesse limpa. Estes valores são os retirados por interpolação do gráfico da Figura 9.2 e que foram mencionados anteriormente.

Então, o número de sóis com a janela da lâmpada limpa em função do tempo é dado pela seguinte expressão:

$$N_l(t) = N_{l0} + \frac{N_{lf} - N_{l0}}{T} t \quad (9.1)$$

O número de sóis tendo em conta o material depositado na superfície da lâmpada é  $N(t)$ , assumindo que a limpeza  $i$  teve origem no instante  $t_i$  e a seguinte em  $t_{i+1}$ :

$$N(t) = N_l(t_i)[1 - P(t - t_i)] \quad (9.2)$$

onde o coeficiente de perda,  $P$ , é obtido a partir do último intervalo de medição em que:

$$\frac{N(t_{n+1}) - N(t_n)}{N(t_n)} = -P \cdot (t_{n+1} - t_n) \quad (9.3)$$

Através destas expressões foi possível calcular o valor do número de sóis ao longo da experiência (Figura 9.3).

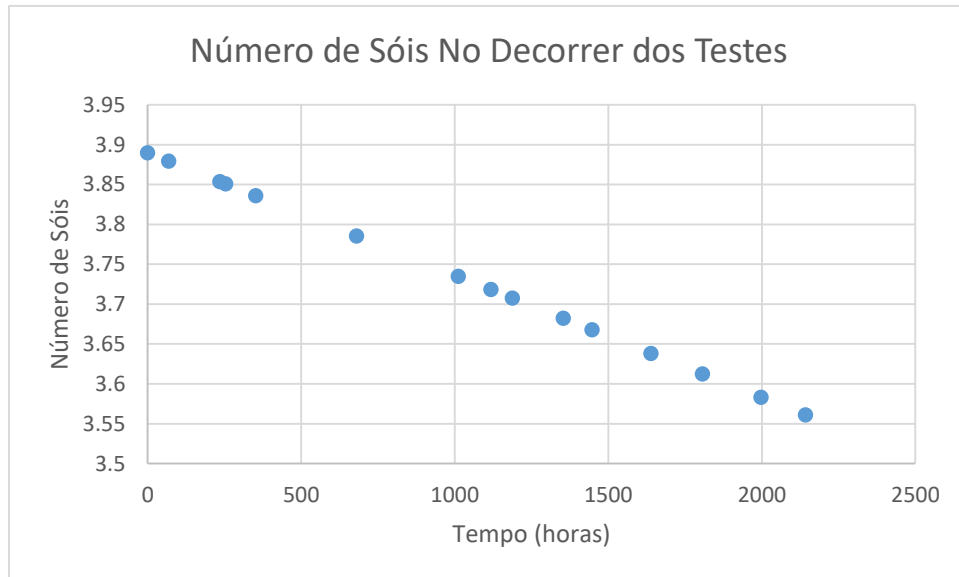


Figura 9.3 - Número de Sóis no decorrer dos testes no sistema de simulação espacial.

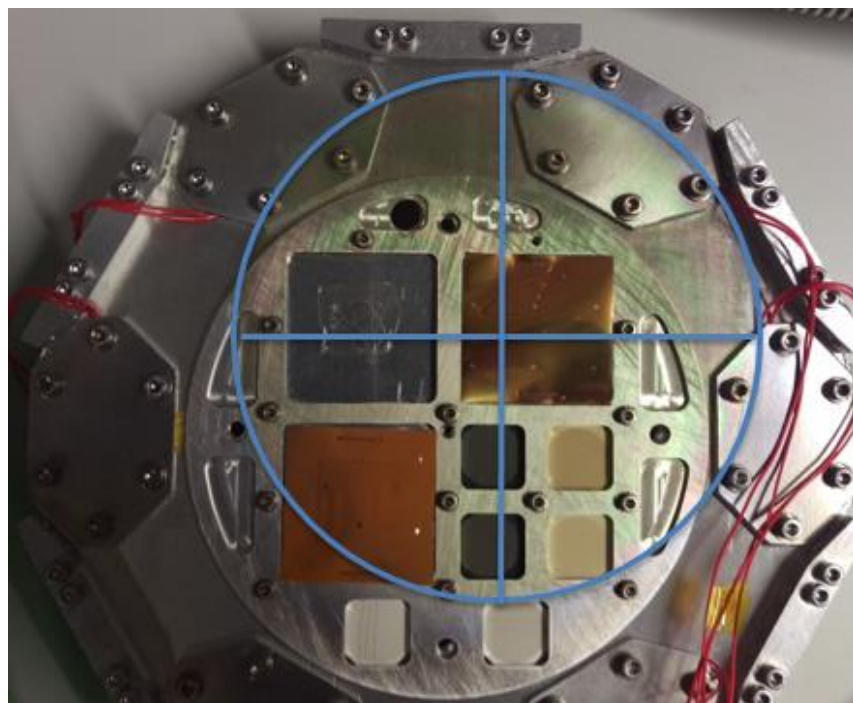
Como se pode observar, esta fórmula induz uma diminuição lenta e linear do número de sóis com o tempo, o que era de esperar, dado que estas lâmpadas têm um tempo de vida relativamente curto e vão perdendo a sua potência. com o tempo.

O produto entre a média do número de sóis ao longo da experiência e o número total de horas de operação da lâmpada representa o número de horas equivalentes de sol (*Equivalent Hours of Sun – EHS*), isto é, o equivalente em horas no espaço. Deste modo, as 2142 horas em laboratório, equivalem, neste caso, a 7996 horas no espaço.



## 9.2. PROBLEMAS NO ALINHAMENTO DO SISTEMA

Apenas no final dos testes e depois de aberta a câmara de vácuo foi possível verificar que a lâmpada não se encontrava alinhada com o centro do porta-amostras. A longa exposição à radiação VUV criou na zona que estava exposta aos raios ultravioletas uma coloração diferente e que se interpretou como correspondente à área em que foram depositados materiais, de uma forma semelhante ao que aconteceu nas janelas da fonte de VUV e do fototubo. Essa área não cobria completamente o porta-amostras e duas das amostras não foram totalmente expostas à luz da lâmpada, como se pode observar na Figura 9.4.



*Figura 9.4 - Porta-amostras e área iluminada pela lâmpada de VUV (assinalada com a linha azul).*

Para resolver, no futuro, o problema de desalinhamento, propõem-se os seguintes passos:

- a) Medição da uniformidade da irradiância no porta-amostras;
- b) Ajuste da posição da lâmpada;
- c) Repetição do passo a) e b) até a área de iluminação da lâmpada estar alinhada com o porta-amostras.

No âmbito desta tese, foi desenhado e fabricado o sistema de medição da uniformidade da irradiância no porta-amostras apesar de, por falta de tempo, não se ter chegado a fazer medições com o mesmo. Na Figura 9.5, encontram-se os desenhos deste sistema, realizados em SolidWorks.

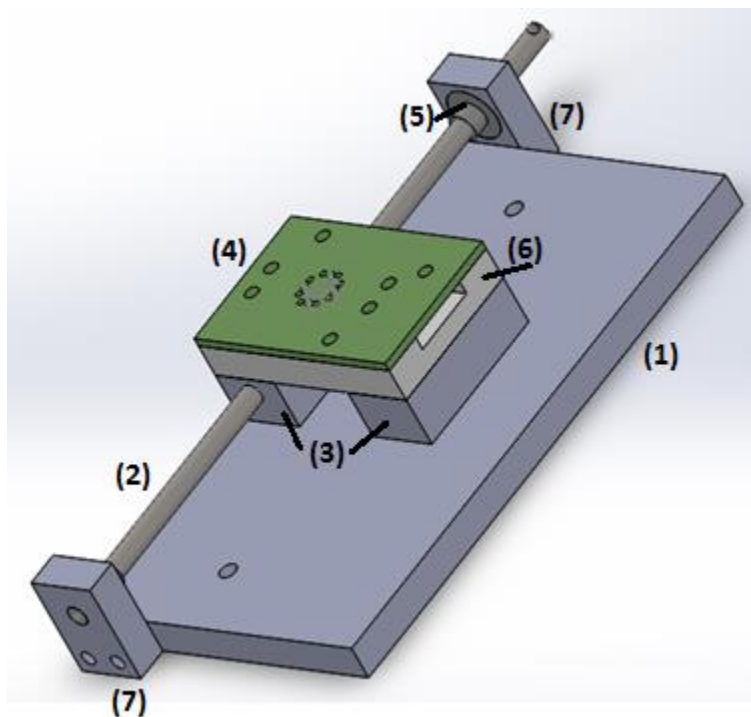


Figura 9.5 – Sistema de mediação da uniformidade da irradiância no porta-amostras. (1) base de alumínio; (2) varão roscado; (3) peças em teflon; (4) peça em epóxi; (5) rolamentos de teflon; (6) peça em alumínio; (7) peças em alumínio que contêm os rolamentos.

Este conjunto seria fixado na base de alumínio do sistema de simulação espacial (porta-amostras), sem as amostras estarem colocadas. Através de um sistema de rolamentos de teflon (ver Figura 9.5), que seria possível acionar fora da câmara de vácuo, o detetor iria mover-se ao longo do porta-amostras de forma a se poder elaborar um perfil da irradiância ao longo desta direção. Na Figura 9.5, na peça de epóxi, que seria a mesma da montagem realizada para colocar o detetor dentro da câmara de vácuo, o *socket* do detetor ficaria colocado também nos mesmos orifícios e seguro da mesma forma.

Estas medições seriam efetuadas numa operação da câmara de vácuo dedicada especificamente para este fim, num intervalo de tempo relativamente curto, não existindo a possibilidade de ocorrer fixação de material orgânico nas janelas do detetor e da lâmpada. Para além de se conseguir, com este sistema, estudar a uniformidade da irradiância, também seria possível identificar o máximo de intensidade na área iluminada pela lâmpada de forma a determinar o realinhamento que esta teria de sofrer de forma a que o porta-amostras ficasse centrado com a área de iluminação.

Relativamente ao ajuste da posição da lâmpada, este poderia ser realizado introduzindo um espaçador com dois sistemas de vedação com o-rings. Esse espaçador teria as duas superfícies opostas que não estariam paralelas, mas com um ângulo que seria calculado a partir das medições de uniformidade. O espaçador poderia ser re-maquinado caso uma segunda medição indicasse essa necessidade.

O aperto/desaperto das porcas que se encontram nos varões-roscados que pressionam toda a interface entre a lâmpada e a câmara de vácuo contra a flange desta última permite simultaneamente acomodar uma situação em que estaria introduzido o pequeno ângulo associado ao espaçador referido anteriormente.

## 10. Conclusões

Têm sido desenvolvidos recentemente vários estudos e testes sobre a degradação de materiais utilizados na cobertura de veículos espaciais. Estes materiais, perante exposição ao ambiente das órbitas da Terra, sofrem degradação e danos permanentes, devido a ameaças que compreendem todo o espectro de radiação eletromagnética e de partículas, em particular da radiação ultravioleta do sol, o oxigénio atómico, a contaminação, os efeitos da temperatura e dos micrometeoritos e detritos orbitais. O impacto destas ameaças depende, obviamente, das propriedades do material e sua suscetibilidade em ser alterado por influência daquelas. Para que as missões espaciais tenham sucesso, e para diminuir os possíveis efeitos de detritos de satélites antigos sobre futuras missões, torna-se condição indispensável um prévio estudo aturado sobre o comportamento dos materiais em ambientes espaciais, apesar da sua difícil concretização.

Em particular, e como explicado anteriormente, a interação da radiação ultravioleta com os materiais constitui um fenómeno complexo e em contínuo estudo, de modo a serem projetados satélites e naves espaciais que possam ser passíveis de sofrer o menor grau possível de degradação e contaminação, sob efeito deste agente presente na órbita LEO.

Com o sistema idealizado e desenvolvido neste trabalho de pesquisa, foi possível realizar medições e calcular a quantidade acumulada de radiação UV incidente nas amostras, sendo crível que este simula de forma acelerada o efeito da radiação VUV, numa série de amostras de materiais espaciais.

Não deixámos de nos confrontar com constrangimentos, durante o desenvolvimento do trabalho, sendo um deles a circunstância de não ter sido possível controlar a irradiância no porta-amostras, uma vez que a janela do detetor de VUV, passadas algumas horas após o sistema a operar, ficava contaminada devido ao *outgassing* em materiais vizinhos, submetido às reações químicas induzidas pela radiação UV. Como consequência dessa contaminação, o sinal de saída diminuía abruptamente.

Caso a janela do detetor não sofresse contaminação, seria possível monitorizar o sistema ao longo dos testes, apesar de na janela da lâmpada de VUV se fixar material orgânico, facto que compele a que ela seja limpa regularmente. Constatou-se, no final dos testes, isto é, após várias limpezas da janela da lâmpada a implicarem a utilização das válvulas da interface, que a válvula localizada imediatamente antes da flange da câmara apresentava uma fuga que será investigada posteriormente, comprometendo o vácuo no interior da câmara. Uma das possíveis causas desta fuga é a deterioração dos o-rings de vitom da válvula de vazio por serem submetidos a radiação UV que, apesar de ser refletida nas diversas superfícies internas do sistema, pode ter intensidade muito elevada. Estes o-ring serão revistos antes de novas utilizações.

A irradiância na janela do detetor de VUV foi, por esse facto, estudada em função da distância entre lâmpada e detetor, mas apenas no início de vida da lâmpada, quando se interromperam os testes, e no final deles. Ainda assim e como já se esperava, verificou-se que a lâmpada sofreu ligeira degradação, durante os testes efetuados no sistema de simulação espacial.

# 11. Desenvolvimentos Futuros

A experiência entretanto acumulada e os resultados obtidos, possibilitam não só a confirmação das potencialidades que o sistema de simulação espacial desenvolvido possui, incluindo o de VUV e o de ciclos térmicos, como permitem ainda antever as vantagens que podem advir da sua aplicação na área de estudo da degradação de materiais espaciais.

Antes de mais, seria necessário otimizar o sistema de posicionamento da lâmpada, de forma a que todo o porta-amostras ficasse iluminado, e um mecanismo de limpeza do detetor. Relativamente a este mecanismo, seria uma solução praticável projetar uma interface de vazio idêntica à da lâmpada na flange oposta. Deste modo, o detetor poderia ser retirado para se efetuar a sua limpeza. Contudo, o formato do detetor não está preparado para funcionar como uma interface de vazio.

Este sistema de simulação espacial poderia constituir-se num sistema de testes para a indústria espacial. Este permitiria estudar outros tipos de materiais frequentemente utilizados em revestimentos de satélites e naves espaciais para além dos que foram estudados neste sistema, como por exemplo o MLI de germânio usado em antenas RF.

## Referências

- [1] E. M. Silverman, Space Environmental Effects on Spacecraft: LEO Materials Selection Guide, National Aeronautics Space Administration, Langley Research Center, Hampton, Virginia 23681-0001: NASA contractor Report 4661, Part1.
- [2] J. Dever, B. Banks, K. de Groh, S. Miller e N. G. R. Center, “Chapter entitled: Degradation of Spacecraft Materials,” em *Handbook of Environmental Degradation of Materials*.
- [3] “Solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables,” [Online]. Available: <http://www.astm.org>, Standard E490-00a, The American Society for Testing and Materials, 2007.
- [4] G. Peng, Y. Dezhuang e S. He, “Effect of VUV Radiation on Properties and Chemical Structure of Polyethylene Terephthalate Film,” China.
- [5] [Online]. Available: [http://www.nasa.gov/mission\\_pages/station/news/orbital\\_debris.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html).
- [6] D. J. Elliott, Ultraviolet Laser Technology and Applications, Wayland, Massachusetts: Academic Press, 1995.
- [7] J. A. Dever, A. J. Pietromica, T. J. Stueber, E. A. Sechkar e R. K. Messer, “Simulated Space Vacuum Ultraviolet (VUV) Exposure Testing for Polymer Films,” Washington, 2002.
- [8] M. R. Adams, “The Degradation of Polymeric Spacecraft Materials by Far-UV Radiation and Atomic Oxygen; UMI Dissertation Services,” 1993.
- [9] M.-P. Hghiem, T. Tondou, J. P. Chardon, D. Faye e J.-F. Roussel, “Parametric Study of Molecular Contaminants Sticking Enhancement Under VUV Irradiation,” ONERA Space Environment Department, Toulouse, France.
- [10] M. Razeghi, Fundamentals of Solid State Engineering, U.S.A.: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [11] J. M. Pamer e B. G. Grant, Art of Radiometry, Bellingham, Washington USA: SPIE Press, 2010.
- [12] Radio Corporation of America; Harrison, N. J., “Phototubes,” U.S.A., 1940.
- [13] W. Heering, “UV Sources - Basics, Properties and Applications,” Lichttechnisches Institut, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany, 2004.
- [14] Hamamatsu, [Online]. Available: [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/Phototubes\\_TPT1001E.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/Phototubes_TPT1001E.pdf).
- [15] S. Deiries, A. Silber, O. Iwert, E. Hummel e J. L. Lizon, “Plasma Cleaning, A new method of ultra-cleaning detector cryostats,” Europa Southern Observatory, Garching, Germany.
- [16] J. Palmer M., “Radiometry and Photometry FAQ,” Optical Sciences Center, University of Arizona, Tucson.
- [17] A. Ryer, Light Measurement Handbook, Newburyport: International Light, 1997.
- [18] J. B. Calvert, 29 Agosto 2001. [Online]. Available: <http://mysite.du.edu/~etuttle/electron/elect30.htm>.
- [19] J. A. Dever, E. J. Bruckner, D. A. Scheiman e C. R. Stidham, “Combined Contamination and Space Environmental Effects on Solar Cells and Thermal Control Surfaces,” Colorado Springs , Colorado, 1994.

- [20] J. Dever e K. K. de Groh, "Vacuum Ultraviolet Radiation and Atomic Oxygen Durability Evaluation of HST Bi-Stem Thermal Shield Materials," NASA, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio, 2002.
- [21] N. Levy, E. Grossman, I. Gouzman e Y. Noter, "VUV Radiation With Outgassing Products of Black Paints: In-Situ NUV-VIS Spectroscopy and Complementary Studies," Noordwijk, Netherlands, 2003.
- [22] J. A. Townsend, P. A. Hansent, J. A. Devert, K. K. de Groh e B. A. Banks, "Hubble Space Telescope metallized Teflon FEP thermal control materials: on-orbit degradation and post-retrieval analysis," 1998.
- [23] NASA, "Orbital Debris," [Online]. Available: <https://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photo-gallery.html>.
- [24] ESA, "esa," [Online]. Available: [http://www.esa.int/About\\_Us/ESOC/Space\\_debris\\_assessing\\_the\\_risk](http://www.esa.int/About_Us/ESOC/Space_debris_assessing_the_risk).
- [25] J. A. Dever e C. A. McCracken, "Effects of Various Wavelength Ranges of Vacuum Ultraviolet Radiation on Teflon FEP Film Investigated," NASA, 2004.

## 12. Anexo A

Grandeza	Distância (mm)	Fonte de Incerteza	Valor médio	Processo Avaliação	Valor da comp. Un.	Tipo de avaliação	Divisor	Incerteza padrão [ $u(x_i)$ ] Un.	Incerteza padrão combinada	Incerteza expandida
Corrente I	616.88	Repetibilidade	0.8513 $\mu\text{A}$	-	5.38E-02 $\mu\text{A}$	A/normal	1.00	5.38E-02 $\mu\text{A}$	5.38E-02	0.11
		Picoamperímetro	-	incerteza	0.150 %rdg	B/normal	2.00	6.38E-04 $\mu\text{A}$		
	848.12	Repetibilidade	0.3910 $\mu\text{A}$	-	1.27E-02 $\mu\text{A}$	A/normal	1.00	1.27E-02 $\mu\text{A}$	1.27E-02	0.03
		Picoamperímetro	-	incerteza	0.150 %rdg	B/normal	2.00	2.93E-04 $\mu\text{A}$		
	875.87	Repetibilidade	0.3065 $\mu\text{A}$	-	2.33E-04 $\mu\text{A}$	A/normal	1.00	2.33E-04 $\mu\text{A}$	3.28E-04	0.001
		Picoamperímetro	-	incerteza	0.150 %rdg	B/normal	2.00	2.30E-04 $\mu\text{A}$		

# 13. Anexo B

N - número de sóis Vout - Tensão de saída												
Modelo matemático: $N = c \frac{V_{out}}{R1}$ onde $\frac{C}{R1} = 1.02 A^{-1} \Omega^{-1}$												
Grandeza	Distância (mm)	Fonte de Incerteza	Valor Médio	Processo Avaliação	Valor da comp. Un.	Tipo de avaliação	Divisor	Incerteza padrão $[u(x_i)]$ Un.	Coeficiente sensib. $[c_i]$ Un.	Comp. quadrática $[c_i \cdot u(x_i)]^2$ Un.	Incerteza padrão combinada	Incerteza expandida
Tensão de saída Vout	616.88	Repetibilidade	9.12 V	-	1.33E-02 V	A/normal	1.00	1.33E-02 V	1.02E+00 1/V	1.85E-04	3.96E-02	0.079
		Voltímetro	-	incerteza	0.800 %	B/normal	2.00	3.65E-02 V	1.02E+00 1/V	1.39E-03		
	848.12	Repetibilidade	3.84 V	-	2.67E-02 V	A/normal	1.00	2.67E-02 V	1.02E+00 1/V	7.40E-04	3.14E-02	0.063
		Voltímetro	-	incerteza	0.800 %	B/normal	2.00	1.53E-02 V	1.02E+00 1/V	2.45E-04		
	875.87	Repetibilidade	3.18 V	-	2.33E-02 V	A/normal	1.00	2.33E-02 V	1.02E+00 1/V	5.67E-04	2.71E-02	0.054
		Voltímetro	-	incerteza	0.800 %	B/normal	2.00	1.27E-02 V	1.02E+00 1/V	1.68E-04		

N - número de sóis I - corrente medida através do picroamperímetro												
Modelo matemático: $N = cI$ onde $c = \frac{\int E_{NA}d\lambda}{1.073 \times 10^{-5} A_{detetor} \int E_{NA}R_{NA}d\lambda} = 1.02 \times 10^4 mA^{-1}$												
Grandeza	Distância (mm)	Fonte de Incerteza	Valor médio	Processo Avaliação	Valor da comp. Un.	Tipo de avaliação	Divisor	Incerteza padrão $[u(x_i)]$ Un.	Coeficiente sensib. $[c_i]$ Un.	Comp. quadrática $[c_i \cdot u(x_i)]^2$ Un.	Incerteza padrão combinada	Incerteza expandida
Corrente I	616.88	Repetibilidade	0.00085 mA	-	5.38E-05 mA	A/normal	1.00	5.38E-05 mA	1.02E+04 1/mA	3.01E-01	5.49E-01	1.098
		Picoamperímetro	-	incerteza	0.150 %rdg	B/normal	2.00	6.38E-07 mA	1.02E+04 1/mA	4.24E-05		
	848.12	Repetibilidade	0.00039 mA	-	1.27E-05 mA	A/normal	1.00	1.27E-05 mA	1.02E+04 1/mA	1.67E-02	1.29E-01	0.259
		Picoamperímetro	-	incerteza	0.150 %rdg	B/normal	2.00	2.93E-07 mA	1.02E+04 1/mA	8.95E-06		
	875.87	Repetibilidade	0.00031 mA	-	2.33E-07 mA	A/normal	1.00	2.33E-07 mA	1.02E+04 1/mA	5.67E-06	3.34E-03	0.007
		Picoamperímetro	-	incerteza	0.150 %rdg	B/normal	2.00	2.30E-07 mA	1.02E+04 1/mA	5.50E-06		



Tendo em conta que estamos a tomar o circuito com o picoamperímetro como padrão, para se representar o gráfico do número de sóis calculados com os valores de tensão obtidos com o circuito de aquisição, em função da tensão de saída  $V_{out}$ , é necessário corrigir esse número de sóis em relação ao número de sóis obtidos com o picoamperímetro. Para tal, faz-se a diferença entre os dois para cada distância, obtendo-se o erro. Se ajustarmos esse erro a cada valor de número de sóis do circuito de aquisição, obtém-se o número de sóis corrigido, obtidos com o circuito de aquisição, que, no caso concreto, é obviamente igual ao número de sóis calculados com os valores obtidos a partir do picoamperímetro. A incerteza expandida para cada um dos pontos corrigidos é calculada através de seguinte expressão:

$$Incerteza\ expandida = k \sqrt{\left(\frac{i_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{i_2}{2}\right)^2} \quad (10)$$

Em que  $i_1$  é a incerteza expandida do número de sóis calculados com os valores de corrente obtidos com o picoamperímetro,  $i_2$  a incerteza expandida número de sóis calculados com os valores de tensão obtidos com o circuito de aquisição, e  $k$  o fator de expansão ( $k=2$ ).

No gráfico 4, podem observar-se a reta de calibração do gráfico 1 e curvas de tendências ajustadas aos extremos das barras de erro. Esta análise tem como função poder determinar a incerteza associada a um valor de número de sóis de VUV calculado através da reta de calibração, visto que cada ponto tem uma barra de erro diferente.

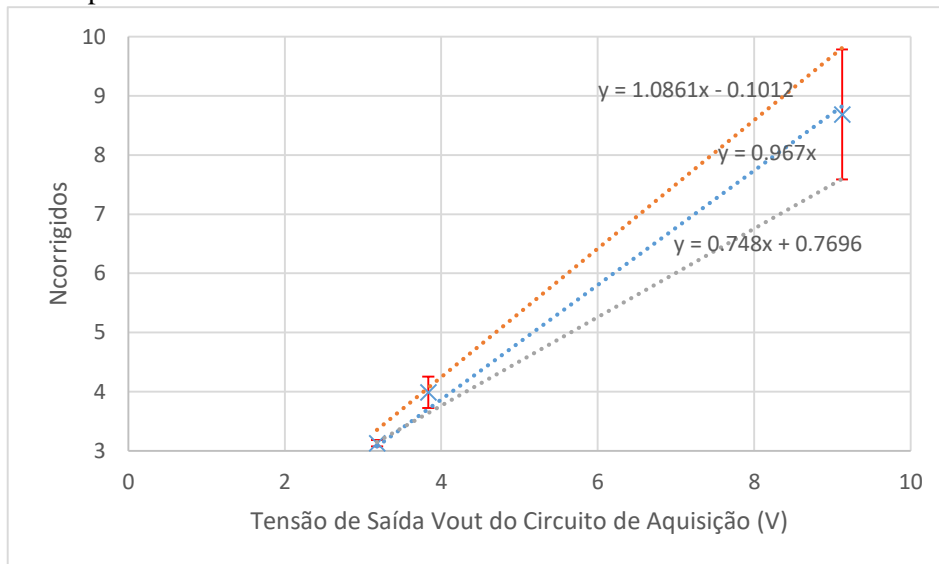
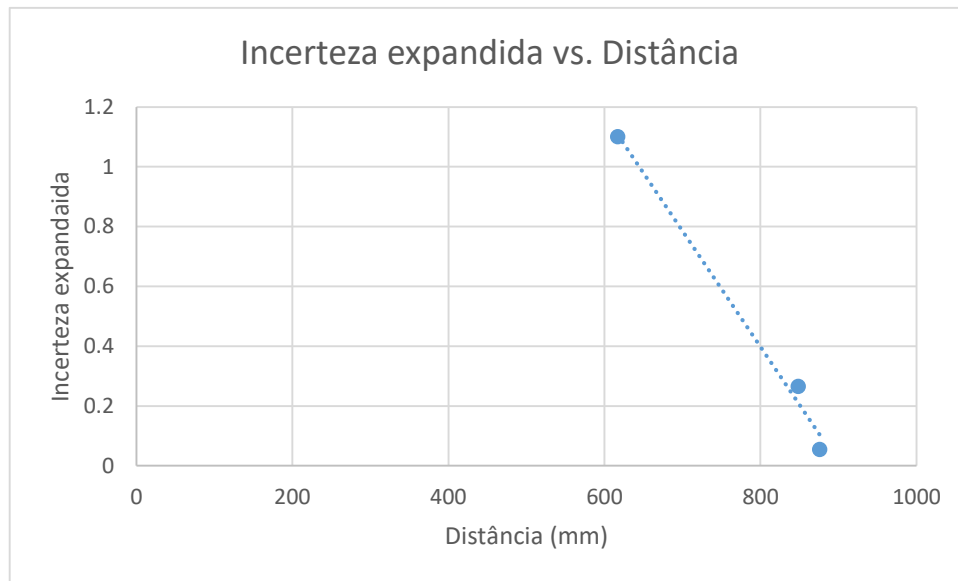


Figura 11.1 – Reta de calibração e curvas de tendência ajustadas aos extremos das barras de erro.

No gráfico 5, estão representadas as incertezas expandidas do número de sóis já calculadas em função da distância.

Como se verificou já, quanto maior a distância, menor a corrente e tensão lidas. Dado a incerteza associada aos instrumentos de leitura ser relativa ao valor lido, conclui-se que a incerteza expandida do número de sóis diminui com a distância, como justamente se observa no gráfico 5.



*Figura 11.2 – Variação da incerteza expandida em função da distância.*